

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Determinación de caudales extremos mediante modelización hidrológica y análisis de escenarios.

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: Oñate Paladines, Arianna Yadira DIRECTOR: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, Dr.

LOJA – ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <u>http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es</u>

2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Doctor.

Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN.

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: *Determinación de caudales extremos mediante modelización hidrológica y análisis de escenarios* realizado por **Oñate Paladines Arianna Yadira** ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre de 2017

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

"Yo, *Arianna Yadira Oñate Paladines* declaro ser autor (a) del presente trabajo de titulación: *Determinación de caudales extremos mediante modelización hidrológica y análisis de escenarios*, de la Titulación *Ingeniería Civil*, siendo *Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso* director (a) del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad"

Autor: Arianna Yadira Oñate Paladines

Cédula: 1105719874

DEDICATORIA

A mis padres, Kattia y Fernando, que con su ejemplo, cariño y motivación han sabido guiarme por el mejor camino.

A mi hermano Rodrigo, por su compañía y felicidad, que hace que cada día sea una aventura.

Los amo inmensamente.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todas sus bendiciones. Por haberme dado la mejor familia que podría pedir. Por todas la oportunidades pasadas, y por aquellas que están por venir.

Gracias a mi familia maravillosa, que siempre me brinda su apoyo y cariño incondicional. Por favor, nunca me falten.

Gracias nuevamente a mi papito y director de tesis Fernando, por sus enseñanzas, su paciencia, su ejemplo y su guía durante no sólo la elaboración de este proyecto de tesis, sino durante toda mi vida. Espero que te sientas tan orgulloso de mí como yo me siento de ti.

Gracias a David Montaño por su cariño, paciencia y cuidado, y a José Vicente Capa, por ser un gran amigo y compañero. Los quiero mucho.

INDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii			
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	. iii			
DEDICATORIA	. iv			
AGRADECIMIENTOv				
INDICE DE CONTENIDOS	. vi			
RESUMEN	. 1			
ABSTRACT	. 2			
INTRODUCCIÓN	. 3			
1. GENERALIDADES	. 5			
1.1 Modelación hidrológica	. 6			
1.2 Precipitación	. 8			
1.2.1 Precipitación promedio.	. 8			
1.3 Pérdidas por infiltración	. 9			
1.3.1 Modelo de Horton	. 9			
1.3.2 Modelo de Green- Ampt	. 9			
1.3.3 Número de la curva SCS	10			
1.4 Relación lluvia-escurrimiento	11			
1.4.1 Hidrograma unitario	12			
1.5 Tránsito de avenidas en cauces: Método de Muskingum Cunge	14			
1.6 Cambio de uso de suelo: TerrSet	15			
1.7 Análisis de frecuencias para caudales máximos	15			
2. METODOLOGÍA	17			
2.1 Zona de estudio	18			
2.1.1 Ubicación y caracterización general.	18			
2.1.2 Relieve, tipo y cobertura de suelo	19			
2.1.3 Características climáticas	19			
2.1.4 Características de precipitación	19			
2.1.5 Características hidrométricas	20			
2.2 Recopilación de información2	20			
2.3 Delimitación de la cuenca del río Zarumilla2	20			
2.3.1. Pre procesamiento del terreno HEC-GeoHMS	22			
2.3.2. Procesamiento de la cuenca	23			

2.3.3.	Características de la cuenca	. 23	
2.3.4.	2.3.4. Procesamiento HMS		
2.4 Car	acterísticas físico-morfométricas	. 24	
2.4.1.	Tiempo de retardo	. 24	
2.4.2.	Determinación del tiempo de retardo mediante Kirpich	. 24	
2.4.3.	Determinación del tiempo de retardo mediante Giandotti	. 24	
2.4.4.	Determinación del tiempo de retardo mediante Temez	. 25	
2.4.5.	Determinación del tiempo de retardo mediante Passini.	. 25	
2.5 Núr	nero de la curva	. 25	
2.5.1.	Tipo de suelo	. 26	
2.5.2.	Uso de suelo	. 27	
2.5.3.	Condición hidrológica.	. 28	
2.5.4.	Humedad antecedente.	. 29	
2.6 Tor	mentas de diseño	. 29	
2.7 Rela	aciones Iluvia – escorrentía	. 34	
2.8 Trái	nsito de caudales	. 36	
2.9 Imp	lementación del modelo	. 38	
2.9.1	Modelo topológico de la cuenca	. 39	
2.9.2	Modelo meteorológico.	. 40	
2.9.3 Consideración de la bocatoma La Palma como embalse		. 40	
2.9.4	Calibración del modelo.	. 41	
2.10 Esc	enario de cambio de uso de suelo	. 43	
3. ANÁLISIS	Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	. 45	
3.1 Moo	delo HEC-HMS	. 46	
3.1.1	Delimitación de la cuenca	. 46	
3.1.2 Parámetros de las subcuencas		. 48	
3.1.3	Parámetros de los tramos entre aportes de caudal al cauce principal	. 49	
3.1.4	Tormentas de diseño	. 49	
3.1.5	Implementación del modelo	. 51	
3.2 Car	nbio de uso de suelo	. 58	
3.2.1	3.2.1 Escenario de cambio de uso de suelo para 2027.		
3.2.2 Cambio de uso de suelo entre 2014 y 2017		. 60	
3.2.3	Cambio de uso de suelo entre 2014 y el escenario generado para 2027	. 61	
3.2.4 suelo al	Caudales de máxima crecida correspondientes al escenario de cambio de uso 2027.	de 63	

CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	75

RESUMEN.

El modelo HEC-HMS fue aplicado en la cuenca del río Zarumilla para simular los caudales que se presentarían ante un evento de precipitación máxima, con una duración de 6 horas y para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. El modelo se calibró mediante un análisis de frecuencias utilizando la información hidrométrica disponible para la estación La Palma. El modelo se ejecutó satisfactoriamente y los caudales máximos resultantes en la salida de la cuenca, fueron de 1100 m³/s para 25 años, 1290 m³/s para 50 años y 1670 m³/s para 100 años.

En la misma cuenca se generó un escenario de uso de suelo para el año 2027 usando información del 2014 y 2017. Las transiciones con mayor área de influencia observadas fueron pasto a cultivo, bosque a cultivo y cultivo a pasto. Otras clasificaciones no presentan un cambio significativo. Los caudales calculados con la cobertura del escenario generado son menores a aquellos calculados para el 2017, debido a la expansión de los cultivos, que en una mayor parte son de tipo frutal. Pese a esto, la variación de caudales no es muy significativa.

PALABRAS CLAVES: Caudales de Crecida. Modelo hidrológico. HMS. Escenarios de cambio de uso de suelo.

ABSTRACT.

The HEC-HMS model was applied in the basin of Zarumilla river to simulate the flows that would occur with a maximum precipitation event, with a duration of 6 hours and for return periods of 25, 50 and 100 years. The model was calibrated using a frequency analysis of the hydrometric information available for La Palma station. The model was successfully executed and the maximum flow rates of the basin were 1100 m³/s for 25 years, 1290 m³/s for 50 years and 1670 m³/s for 100 years. In the same basin, a land use scenario was generated for the year 2027 using information from 2014 and 2017. The transitions with the greatest area of influence observed were pasture to cultivation, forest to crop and pasture. Other classifications do not show a significant change. The calculated flows with the coverage of the generated scenario are smaller than those calculated for 2017, due to the expansion of the crops, which are mostly fruit type. In spite of this, the variation of flows is not very significant.

KEY WORDS: Maximum flow rate. Hydrological model. HMS. Land change scenarios.

INTRODUCCIÓN.

El objetivo general del presente proyecto es desarrollar una metodología para la determinación de caudales extremos, además de generar y analizar escenarios y estudiar su efecto en la respuesta hidrológica de una cuenca. Dicho esto, como objetivos específicos se tiene: Implementar un modelo hidrológico de evento de precipitación en la cuenca del río Zarumilla para determinar los caudales extremos en la misma; generar un escenario de ocupación de suelo para el año 2027 en la cuenca y finalmente evaluar el efecto de este escenario en la hidrología de la cuenca.

El conocimiento adecuado de la variación de la escorrentía en una cuenca es utilizado en el diseño de muchos proyectos hidráulicos, para la predicción de caudales e inundaciones, para el estudio de los procesos lluvia-escorrentía y para la contribución a los planes de manejo de cuencas hidrográficas. Todo esto se lleva a cabo utilizando la modelación hidrológica. La modelación hidrológica es una herramienta que se utiliza principalmente para estimar la respuesta hidrológica de una cuenca ante un evento de precipitación, y para estudiar el efecto que poseen diferentes escenarios, sean de tipo climático, cambio de cobertura, construcción de infraestructura u otros, en los caudales de cuencas medianas y grandes. Lo que la constituye en una herramienta de gran importancia en la toma de decisiones. La selección del modelo depende de la cuenca y el objetivo de la predicción hidrológica en la misma.

Para el desarrollo del proyecto se recopiló y homogeneizó información topográfica, meteorológica, climática, hidrológica, de uso y tipo de suelo existente para la cuenca del río Zarumilla. El modelo utilizado en el estudio fue el HEC-HMS. Para la implementación del modelo hidrológico se desarrolló un modelo topológico, cuyas subcuencas coincidieran con la demarcación de las subcuencas del Plan Binacional de Desarrollo de la Región Fronteriza. Se definieron las tormentas de diseño para los diferentes períodos de retorno considerados: 25, 50 y 100 años, con el uso de las ecuaciones de intensidades máximas de precipitación dispuestas por el INHAMI. Las características de infiltración de cada una de las subcuencas se determinaron empleando el número de la curva para cada una de las unidades de respuesta hidrológica definidas mediante el cruce de los mapas de uso y tipo de suelo. Las características de tránsito hidrológico se definieron en función de las características medias de los cauces existentes en la cuenca en estudio. El modelo se calibró y validó utilizando análisis de frecuencias y la información disponible de caudales máximos en la estación La Palma, lo cual permitió el ajuste entre los caudales calculados y observados.

Se realizó además el estudio multitemporal del uso del suelo utilizando el software TerrSet, con lo que se analizaron los cambios ocurridos en la cobertura de la zona de estudio entre los años 2014 y 2017, empleando redes neuronales y como variables explicativas la topografía del suelo, y la distancia a carreteras y poblados. Con esto, se generó un escenario de uso de suelo para el año 2027, aplicando cadenas de Markov. Se analizó además el efecto que este escenario tendría sobre los caudales de la cuenca.

La investigación se ha estructurado en 4 capítulos como se detalla a continuación:

Capítulo I: Contiene todas las generalidades de la generación de escenarios de cambio de uso de suelo, de la modelación hidrológica, y de los procesos que intervienen en la misma.

Capítulo II: Describe la zona de estudio y contiene la metodología empleada en el proyecto, para la modelación hidrológica y la generación de escenarios de ocupación de suelo.

Capítulo III: Contiene el análisis de resultados de la modelación y generación de escenarios.

Capítulo IV: Contiene las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Modelación hidrológica.

Durante las últimas décadas, se han hecho muchos esfuerzos para estimar con precisión la escorrentía dentro de las cuencas hidrográficas (Sivapalan, 2003). El conocimiento adecuado de la variación de la escorrentía de la cuenca es requerido para muchos proyectos hidráulicos, siendo ideal para la mayoría de los mismos conocer la magnitud exacta y el tiempo real de ocurrencia de todos los eventos de flujo durante la vida útil del proyecto (Oleyiblo & Li, 2010). La determinación de estas futuras condiciones hidrológicas se lleva a cabo con la implementación de modelos adecuados, para predicción de inundaciones y estudio de los procesos lluvia-escorrentía (Crawford & Maidment, 1966).

La modelación hidrológica es una herramienta que se utiliza para estimar la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento de precipitación. La selección del modelo depende de la cuenca y el objetivo de la predicción hidrológica en la misma (Halwatura, 2013). Con el uso de herramientas SIG se puede realizar la extracción de información hidrológica, como la dirección del flujo, la acumulación de flujo, los límites de las cuencas y las redes de caudales, a partir de un DEM (modelo de elevación digital). La estimación de caudales y demás parámetros hidrológicos se vuelve una tarea aún difícil por los efectos combinados de cambio climático (Alcamo, 2007) y cambio en el uso de la tierra debido al aumento de la población o la presión económica (DeFries, 2010).

Como la modelación hidrológica es un proceso que exige datos y contiene un alto grado de incertidumbre (Leimer, 2011). En áreas escasas de datos, predecir el hidrograma de inundación se vuelve aún más difícil. La disponibilidad limitada de datos hidrológicos es un obstáculo importante para la implementación de modelos hidrológicos detallados. En los casos en que los datos disponibles son limitados, los modelos hidrológicos deben simplificarse y considerar un número mínimo de parámetros (Ahmad, 2009). El modelo debe ser calibrado y validado para la cuenca hidrográfica de estudio y debe emplearse datos fiables para verificar la idoneidad del mismo (Halwatura, 2013).

El sistema de modelamiento hidrológico (Hydrologic Modeling System) HEC-HMS es un software diseñado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, que permite simular los procesos hidrológicos que se desarrollan en una cuenca, incluyendo: precipitación, infiltración, escorrentía superficial, flujo base y flujo de canales abiertos, de manera que se pueda llevar a cabo: (1) estudios de inundaciones urbanas; (2) estudios de frecuencia de inundaciones; (3) estudios de planificación de sistemas de alerta de inundaciones; (4) estudios de diseño de

embalses y (6) estudios ambientales. (Ford, Pingel, & DeVries, 2008). HEC-HMS es un sistema de modelización capaz de representar diferentes tipos de cuencas. El modelo se construye separando el ciclo del agua en partes manejables y definiendo límites alrededor de la cuenca de interés. (Scharffenberg & Ely, 2010)

La representación física de una cuenca hidrográfica se realiza mediante un modelo numérico. Los elementos hidrológicos se conectan mediante una red dendrítica para simular los procesos de escorrentía. (USACE, 2016) El modelo conceptualiza la cuenca en una red de subáreas conectadas por canales, que pueden ser generadas mediante el componente para Arc-GIS denominado HEC-Geo HMS, que acelera la creación del modelo al disponerse capas de datos SIG adecuadas.

El modelo de cuenca se establece para cada subcuenca utilizando dos elementos disponibles en el software: subcuenca y unión. El elemento subcuenca maneja la pérdida de infiltración y los procesos de transformación de lluvia- escorrentía. El elemento de unión maneja los datos de flujo observados. (Laouacheria & Mansouri, 2015). El modelo básico que se utiliza con el software HEC-HMS comprende tres procesos vitales: pérdida, transformación y flujo base. Cada elemento lleva a cabo una función diferente en el proceso de lluvia-escorrentía, que tiene como finalidad la obtención de hidrogramas de flujo a la salida de la cuenca, para un determinado periodo de retorno (Oleyiblo & Li, 2010).

Según la experiencia llevada a cabo en las cuencas de Misai y Wanan en la República de China, Oyeliblo & Li (2010) establecen que el modelo HEC-HMS predice satisfactoriamente la descarga máxima basándose en los datos históricos disponibles sobre las inundaciones, siendo el volumen de inundación como el tiempo bastante precisos. La complejidad de la estructura del modelo no determina su idoneidad y eficiencia. (Oleyiblo & Li, 2010). Por otro lado, Laouacheria et al, (2014) realizaron una comparación entre los modelos HEC-HMS y WBNM para la generación de hidrogramas de escorrentía en una cuenca urbana. De donde se dice que la exactitud de los resultados de los modelos hidrológicos depende de la hipótesis subyacente y de la disponibilidad de datos. El modelo HEC-HMS tiene como parámetros más sensibles el CN y el tiempo de concentración y muestra además un mejor rendimiento estadísticamente hablando (Laouacheria & Mansouri, 2015).

En otra experiencia conducida en la cuenca del río Attanagalu Oya por Halwawtura et al., el HEC-HMS simuló satisfactoriamente el flujo a la salida de la cuenca, posterior a su calibración y validación. En los siguientes apartados se describen elementos a tener en cuenta para una modelización HEC-HMS.

1.2. Precipitación.

Se denomina precipitación a todos los productos formados por la condensación de vapor atmosférico (lluvia, granizo, neblina, etc.) que caen hacia la superficie terrestre (Zapata, 2002)

1.1.1 Precipitación promedio.

1.2.1.1 Curvas isoyetas.

Debido a que las lluvias varían en el espacio y en el tiempo, una forma común de representarlas es mediante un mapa de isoyetas, en donde una isoyeta es un contorno de lluvia constante, que une puntos con igual profundidad de lluvia. Estos mapas se construyen interpolando información de lluvia recopilada por pluviógrafos (Chow, 1994). En la literatura se encuentran gran número de ejemplos del uso y generación de isoyetas como Teixeira & Carfan (2014) que utilizaron el software Geostatistics para generar las isoyetas de una región al sur de Brasil con datos homogeneizados, para la observación de la variablilidad de la precipitación por fenómenos naturales como El Niño; y Neppel & Desbordes (2001) que investigaron la distribución de las áreas de las isoyetas con varias profundidades de precipitación para el departamento de Aude, para compararlas con las precipitaciones de un evento de lluvia en 1993, demostrando que la localización del evento fue excepcional, más no la extensión espacial o su profundidad de lluvia.

1.2.1.2 Método de Thiessen.

El método de Thiessen considera que en cualquier punto de la cuenca la profundidad de lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano. La lluvia registrada en la estación se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica (Chow, 1994). Las áreas de aplicación se determinan mediante la creación de polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes, que consideran el criterio de menor distancia (SAGARPA, Hidrología Aplicada a Pequeñas Obras Hidráulicas, 2008). Ejemplos de la utilización de los polígonos de Thiessen pueden encontrarse en: Croley & Hartmann (1985) que utilizaron los polígonos de Thiessen con datos meteorológicos casi en tiempo real, con una red red de recopilación de datos que cambiaba con frecuencia a medida que las estaciones se agregaban o fallaban, desarrollando un algoritmo más eficiente para disminuir gastos computacionales y proporcionan aproximaciones aceptables.

Por otro lado, Damant, C et al. (1983) compararon los datos de radar de alta resolución para estimar la precipitación media, y los datos recogidos por estaciones pluviométricas y distribuidos utilizando polígonos de Thiessen, con lo cual se obtuvo errores de 3% a 69% para toda la cuenca, dependiendo de la cantidad de estaciones activas.

1.3 Pérdidas por infiltración.

La infiltración es el proceso por el cual el agua superficial penetra hacia el suelo, quedando retenida en éste o penetrando hasta un acuífero. (Monsalve, 1995). La infiltración depende de factores como tipo, humedad, y compactación del suelo, presencia de vegetación, presencia de zonas urbanizadas, pendiente, entre otros. La infiltración puede estimarse con modelos empíricos, entre los cuales se encuentran: Horton, Green-Ampt y el método del número de la curva SCS.

1.1.2 Modelo de Horton.

Horton (1939) estableció que si un suelo es sometido a una precipitación con intensidad siempre superior a la capacidad de infiltración, la infiltración decrece exponencialmente desde un punto inicial $f_{(0)}$ hasta alcanzar una tasa constante $f_{(c)}$ la cual indica un estado de saturación (Ruiz & Martinez, 2015). El área por debajo de la curva de la ecuación de Horton representa la profundidad del agua infiltrada durante el intervalo considerado. Los valores $f_{(0)}$ y $f_{(c)}$ dependen tanto del tipo de suelo como de vegetación, así como del contenido de humedad inicial en el suelo (Ruiz & Martinez, 2015). El método de Horton fue aplicado por Fernández & Caviedes (2016) para el cálculo de flujo superficial con ayuda del modelo 2D Shallow Water Equations, combinando dos leyes de infiltración: Horton y Green-Ampt. Con esto se determinó que las condiciones iniciales de la cuenca y el patrón pluviométrico tienen una relevancia especial en la calidad del ajuste, por lo que la topografía de la cuenca y las características de la tormenta afectan la calibración de los parámetros de infiltración.

1.1.3 Modelo de Green- Ampt.

Green & Ampt (1911) propusieron un modelo simplificado para infiltración que se deriva de la ecuación de Darcy. Los parámetros que intervienen en este modelo son la conductividad hidráulica, tiempo, cabeza de succión del suelo en el frente mojado, porosidad efectiva del suelo, saturación efectiva, contenido de humedad, entre otros. Los parámetros del modelo de Green-Ampt deben medirse experimentalmente para obtener buenos resultados; en ausencia de datos experimentales, los valores se pueden estimar en función de la textura del suelo. Hsu et al. (2017)

usaron el modelo tradicional y modificado de Green-Ampt en experimentos de infiltración en columnas de arena pre humedecidas. Como resultado se obtuvo que el modelo modificado de Green-Ampt posee mejores resultados que el modelo clásico, ya que el clásico subestima la cabeza de succión. El modelo de Green-Ampt también ha sido utilizado satisfactoriamente en suelos con capas verticales de diferentes tipos por Deng & Zhu (2016) y Xiang & Ling (2016).

1.1.4 Número de la curva SCS.

El Soil Conservation Service (SCS) desarrolló un procedimiento para obtener la precipitación efectiva o la lámina que produce escorrentía superficial directa (Aparicio, 1992). Al representar gráficamente la relación entre la precipitación y la precipitación efectiva utilizando las expresiones propuestas por el SCS, el SCS obtuvo una familia de curvas con las cuales determinó el parámetro adimensional denominado número de la curva (CN), que va de 1 a 100 (Ruiz & Martinez, 2015). Al ser la capacidad de retención de la cuenca inversamente proporcional al número de la curva, cuando CN adopta valores cercanos a 1, la capacidad de retención en la cuenca es máxima y no se produce escorrentía. Por otro lado, con valores cercanos a 100 la capacidad de retención es nula y la escorrentía será igual a la precipitación. La metodología del número de la curva considera el tipo de suelo, la humedad antecedente, la ocupación del suelo, la condición hidrológica y la existencia de práctica de conservación (Ponce V., 1989).

El tipo de suelo se escoge de 4 grupos hidrológicos de suelo que son definidos según la permeabilidad del mismo, mientras que la humedad antecedente es la cantidad de lluvia caída en la cuenca durante los 5 días anteriores al mencionado evento. Los valores de CN encontrados en tablas son expresados como una condición antecedente de humedad intermedia, y pueden corregirse mediante expresiones para la condición real (Chow, 1994).

Ajmal et al. (2014) establece que los valores de CN deben calibrarse utilizando los datos de lluviaescorrentía observados en las cuencas regionales. Con la calibración para 15 cuencas de Corea del Sur, los valores obtenidos de precipitaciones y escorrentía, tuvieron un rendimiento superior en 14 de las 15 cuencas hidrográficas. Shadeed & Almasri (2010) utilizaron satisfactoriamente el método del número de la curva (CN) basado en los sistemas de información geográfica (SIG) para la predicción y cuantificación de la escorrentía de una cuenca en Palestina. De la misma manera, Viji & Prassana (2015) utilizó el número de la curva y el modelo de Green-Ampt conjuntamente con los SIG, comparando los resultados para ambos casos. Los resultados mostraron que el modelo del número de la curva subestima la escorrentía, comparándola con el método de Green-Ampt.

1.4 Relación Iluvia-escurrimiento.

Se define como escurrimiento al porcentaje del agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre hasta llegar a una corriente y luego ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1992). Las relaciones lluvia - escorrentía cuentan con una serie de metodologías, que permiten estimar valores de caudal en un determinado punto de la red de drenaje, en función de datos de precipitación y de las características de la cuenca (Allen & Bateman, 2007).

Cuando existe carencia de información hidrológica la determinación de caudales se realiza mediante la relación lluvia-escorrentía, debido a que los registros de precipitación son más abundantes. Un hidrograma relaciona las variaciones del caudal con el tiempo en un punto dado de la corriente, siendo el área bajo el hidrograma el total escurrido. Según Aparicio (1992) un hidrograma posee los siguientes elementos:

- Rama ascendente: Tramo inicial del hidrograma, entre el instante en el que el agua producida por la tormenta comienza a llegar a la salida de la cuenca y el instante en el que la corriente alcanza su caudal máximo. El inicio de la rama ascendente se puede dar inmediatamente después de iniciada la tormenta, durante la misma luego de que comenzó la precipitación, según el tamaño de la cuenca, tipo de suelo, pendiente, intensidad y duración de la lluvia.
- Pico del hidrograma: Es el caudal máximo debido a la tormenta que alcanza la corriente.
- Curva de recesión: Es el tramo descendente del hidrograma, que comprende el instante en el cual termina la escorrentía sobre el terreno, quedando sólo la escorrentía en canales y en forma subterránea y el instante en el que el escurrimiento es de origen subterráneo.
- Escurrimiento base: Es aquel conformado por aguas subterráneas y flujo subsuperficial del agua proveniente de tormentas producidas con anterioridad a la estudiada.
- Escurrimiento directo: Es el producido por la precipitación efectiva de la tormenta.
- Tiempo de pico: Es el tiempo que transcurre entre la llegada del agua proveniente de la tormenta y el pico del hidrograma.
- Tiempo base: Es el tiempo que dura el escurrimiento directo.
- Tiempo de concentración: Es el tiempo necesario para que una gota de agua que cae en el punto más alejado a la salida, llegue a la salida de la cuenca.

Existen algunas metodologías para expresar el hidrograma correspondiente a una tormenta aislada, entre ellas se destacan las siguientes:

1.1.5 Hidrograma unitario.

El hidrograma unitario es aquel resultante de 1 mm de exceso de precipitación generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva (Borreiros, 2014). Según Aparicio (1992), el hidrograma unitario tiene como hipótesis:

- Tiempo base constante.- La duración total de escurrimiento directo es igual para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independientemente del volumen total escurrido.
- Linealidad o proporcionalidad.- Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base, son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo, es decir, al volumen total de lluvia efectiva. Por esto, las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí.
- Superposición de causas y efectos.- El hidrograma que resulta de un período de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de períodos de lluvia precedentes.

1.4.1.1 Hidrograma unitario tradicional.

Al existir la disponibilidad de registros de precipitación y escurrimiento, se puede construir el hidrograma unitario de una precipitación aislada, a partir del hidrograma generado por una tormenta (USON, 2008).

Según Chow (1994), es necesario obtener el volumen de escurrimiento directo V_e y determinar el tiempo base t_b. La altura de precipitación en exceso H_{pe} se determina dividiendo el volumen de escurrimiento directo para el área de la cuenca. Las ordenadas del hidrograma unitario se obtienen dividiendo las ordenadas del hidrograma real para la altura de precipitación efectiva h_{pe}. La duración en exceso correspondiente al hidrograma unitario se obtiene a partir del hietograma de tormenta y del índice de infiltración media. El tiempo base del hidrograma unitario es igual al del hidrograma real.

1.4.1.2 Hidrograma unitario sintético.

Un hidrograma unitario obtenido en base a la información de lluvia y de caudal de una cuenca se puede aplicar solamente para dicha cuenca y para el punto de la corriente del cual se obtuvo la información de caudales. Por ello, existen otros procedimientos que permiten generar hidrogramas unitarios sintéticos que se utilizan para desarrollar hidrogramas unitarios para otros puntos en la corriente dentro de la misma cuenca o en cuencas similares (Chow, 1994). Existen tres tipos de hidrogramas unitarios sintéticos:

- Los hidrogramas que relacionan las características del hidrograma con las características de la cuenca (Snyder, 1938)
- Aquellos basados en hidrogramas unitarios adimensionales (Soil Conservation Service, 1972)
- Aquellos basados en modelos de almacenamiento en la cuenca (Clark, 1943).

1.4.1.2.1 Hidrograma sintético de Snyder.

Snyder (1938) definió algunas relaciones sintéticas para las características de un hidrograma unitario estándar. Según Chow (1994) estas relaciones permiten calcular las cinco características requeridas para generar el hidrograma unitario para una tormenta dada: el caudal pico por unidad de área de la cuenca, el retardo de cuenca, la diferencia de tiempo entre el centroide del hietograma de exceso de lluvia y el pico del hidrograma unitario, el tiempo base y los anchos W del hidrograma unitario al 50 y 75% del caudal pico.

Gumindoga et al. (2016), Halwatura (2016) utilizaron satisfactoriamente el método del hidrograma de Snyder para la simulación de la escorrentía en una cuenca de Zimbabue y Attanagalu respectivamente, con apoyo del software HMS.

1.4.1.2.2 Hidrograma adimensional sintético del Servicio de Conservación de Suelos.

El hidrograma adimensional SCS se basa en la expresión del caudal por la relación del caudal Q con respecto al caudal pico Q_p y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico t_p en el hidrograma unitario (Chow, 1994). Con esto, al disponer datos de caudal pico y tiempo de retardo para la duración de exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse mediante el uso del hidrograma sintético adimensional para la cuenca dada. El hidrograma adimensional se prepara utilizando el hidrograma unitario triangular, el cual es un hidrograma simplificado que proporciona los parámetros fundamentales: caudal pico, tiempo base y tiempo pico (USON, 2008).

Yannopoulos et al. (2010) obtuvo buenos resultados al usar el hidrograma unitario del SCS, el cual requiere fundamentalmente dos parámetros: el tiempo de retardo y el número de la curva CN y asegura que es un método fiable posterior a su calibración. De la misma manera, Adebayo el al. (2017) al realizar un estudio comparativo para una cuenca en el sur oeste de Nigeria, obtuvo resultados más confiables al emplear el método del hidrograma unitario del SCS, además de recomendar este método sobre el de Snyder, debido a que para el desarrollo del hidrograma

utiliza parámetros morfométricos adicionales como la pendiente de la cuenca y el número de la curva, el cual está en función de las propiedades del suelo y cubierta vegetal de la cuenca.

1.4.1.2.3 Hidrograma unitario de Clark.

El Hidrograma Unitario de Clark se utiliza cuando no se dispone de datos de caudales producidos por una tormenta (Fatorrelli & Fernández, 2007), y se basa en que el hidrograma total en el punto de salida de una cuenca es la suma de todos los hidrogramas aportados por las subcuencas que la conforman, debidamente modificados por el efecto de almacenamiento en el río (Ramírez, 2003). La superficie de la cuenca es distribuida entre líneas isocronas (líneas que delimitan las franjas en las que la escorrentía superficial tardará n horas en alcanzar la salida de la cuenca), para determinar el volumen de agua caído en cada franja y considerar el retraso producido por el tránsito del agua a lo largo de la cuenca (Sánchez, 2009). Wilerson et al (2010) usaron el hidrograma unitario de Clark para una cuenca en Indiana, de manera que pudieran usar datos de pendiente y las características de almacenamiento de la cuenca. Con esto obtuvieron un pico 60% menor en comparación con el método SCS, pero comparable al pico real observado.

1.5 Tránsito de avenidas en cauces: Método de Muskingum Cunge.

El tránsito de avenidas es un proceso matemático que permite determinar el cambio en magnitud, velocidad y forma de una onda de flujo en función del tiempo en uno o más puntos a lo largo del cauce (Chavarri, 2008). Se puede definir además como la simulación de la variación de un hidrograma al recorrer un curso de agua. (Aparicio, 1992).

El método de Muskingum asume una ecuación cinemática tipo descarga- almacenamiento, la cual es cambiada por Cunge et al., para predecir la atenuación de la onda del hidrograma basándose en la ecuación de la continuidad y en la forma de difusión de la ecuación de momento (Chavarri, 2008). Franchinia et al. (2011) aplicaron dos modelos de tránsito en un tramo del cauce del río Tiber para la previsión en tiempo real de las descargas: el método de Muskingum Cunge y el método de la Curva de la Razón (RCM). Pese a la obtención de resultados fiables con ambos procedimientos, el método de Muskingum Cunge es mejor debido a que produce buenos resultados para todos los tiempos de espera previstos, a lo largo de todo el tramo del cauce. Por otro lado, Ponce et al. (1996) realizaron una verificación del tránsito de caudales mediante el método de Muskingum-Cunge, comparando el caudal de salida de pico teóricamente calculado y el tiempo de viaje con los generados usando el método de muestreo constante de Muskingum-

Cunge. La estrecha relación entre los resultados analíticos y numéricos subraya la utilidad del método.

1.6 Cambio de uso de suelo: TerrSet.

El uso de la tierra está limitado por factores ambientales como las características del suelo, el clima, la topografía y la vegetación, y resulta de gran importancia para la mayoría de las actividades humanas, incluyendo agricultura, industria, producción de energía, almacenamiento de agua entre otros. Como resultado, el control sobre la tierra y su uso es a menudo un objeto de interacciones humanas intensas (Turner & Moss, 1993).

La deforestación, el desarrollo urbano, la agricultura y otras actividades humanas han alterado sustancialmente el paisaje de la Tierra, afectando a importantes procesos y servicios de los ecosistemas, que pueden tener consecuencias a corto y largo plazo (Wu, 2008). Además del impacto a la biodiversidad y a la atmósfera debido a las prácticas agrícolas, expansión urbana y deforestación, la escorrentía superficial también se ve afectada por el cambio de uso de suelo, variando en volúmenes de caudal y arrastre de sedimentos (Wu, 2008).

Los modelos de simulación de cambio de uso y de cobertura normalmente examinan un paisaje en los puntos iniciales de tiempo t₀ y t₁, y luego predicen el cambio de t₁ a algún punto posterior t₂. Uno de los modelos de cambio de cobertura de suelo ampliamente utilizado es el que ofrece el software TerrSet, el cual es un sistema integrado de software geoespacial que se utiliza para monitorear y modelar el sistema terrestre para el desarrollo sostenible. TerrSet utiliza la herramienta Land Change Modeler, que analiza el cambio de la cubierta terrestre y modelar empíricamente su relación con variables explicativas y proyectar cambios futuros.

Oñate-Valdivieso y Bosque-Sendra (2010) definieron el cambio de uso de suelo en una cuenca hidrográfica binacional, y generaron un escenario a futuro según el desarrollo observado. Con un análisis multi-temporal del cambio de uso de suelo se explicó las transiciones observadas, con el uso de la herramienta IDRISI Andes. Narayan et al. (2014) utilizaron el módulo de red neural integrado en la versión de IDRISI Selva, para predecir y analizar el crecimiento actual y futuro de la ciudad de Muzaffarpur, obteniendo una precisión de 73% para todos los casos.

1.7 Análisis de frecuencias para caudales máximos.

El análisis de frecuencia es utilizado en hidrología para predecir con ayuda de información histórica de caudales el comportamiento que tendrán los mismos a futuro. Se basa en

procedimientos estadísticos, que facilitan el cálculo de la magnitud del caudal asociado a un período de retorno (Aguilera, 2007). Su confiabilidad depende de la cantidad y calidad de datos históricos disponibles para la zona de interés, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada (Aguilera, 2007). El análisis de frecuencia encuentra la magnitud de un evento para un periodo de retorno dado mediante la determinación de los parámetros de las distribuciones de probabilidad que permiten encontrar el factor de frecuencia (EIA, 2017). La distribución de frecuencias puede realizarse principalmente por distribución normal, gumbel, logarítmico-normal, Pearson tipo III, SQRT y GEV (CEDEX, 2013). La metodología empleada depende del ajuste de datos según Overeem et al. (2008), siendo la distribución GEV más conservadora que Gumbel para la extrapolación. Al-anazi y El-Sebaie (2013) establecen que no existe gran diferencia entre Gumbel, Log Pearson tipo 3 y Log Normal. Svensson y Jones (2010) consideran la distribución SQRT por su aplicación específica en precipitaciones máximas.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio.

2.1.1 Ubicación y caracterización general.

Según el INHAMI (2011), la cuenca del río Zarumilla se encuentra ubicada en la zona 17S, al Noroeste de América del Sur, compartida entre Ecuador y Perú. A sus extremos se encuentran las cuencas de los ríos: Arenillas al Norte, Puyango al Este, Tumbes al Sur, y el Océano Pacífico al Oeste. El río Zarumilla viene a ser parte del límite fronterizo entre Ecuador y Perú. Nace en la parte alta de la cuenca a 1200 m.s.n.m y baja hasta Las Palmas, donde se encuentra la Bocatoma para la derivación de caudal hacia el Canal Binacional Zarumilla. Continúa hacia el Puente Bolsico para luego desembocar en el océano Pacífico por el puerto de Hualtaco.

La cuenca del río Zarumilla posee una extensión aproximada de 874 Km² y su área se encuentra dividida con 55% en territorio Ecuatoriano y 45% en territorio Peruano. Aproximadamente 280 km² de esta cuenca son ocupados por la Reserva Nacional de Tumbes, que protege una gran extensión de bosque tropical y bosque seco (INHAMI, Estudio Hidrológico de Caudales Máximos y Levantamiento de Información Ambiental en la Cuenca del Río Zarumilla, 2005).

Debido a su ubicación geográfica, la hidrografía de la cuenca es intermitente, por ello, el río Zarumilla posee largos períodos estiaje, pero durante el invierno, comprendido entre los meses de marzo y agosto, lleva caudales grandes, los cuales llegan incluso a desbordar el río inundando áreas y poblaciones ubicadas a los márgenes del mismo, siendo las más afectadas las ciudades de Huaquillas (Ecuador) y Aguas Verdes (Perú) (INAMHI, 2011).



Figura 1: Ubicación de la cuenca hidrográfica Zarumilla. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Relieve, tipo y cobertura de suelo.

Según INHAMI (2005), el relieve es bastante pronunciado desde el punto más alejado de la salida de la cuenca, con cotas que varían desde los 1200 m.s.n.m, hasta los 100 m.s.n.m. en zonas ubicadas en la parte media de la cuenca. A partir de esta cota, el terreno varía paulatinamente hasta la cota 6 m.s.n.m mientras se acerca a la salida de la cuenca.

Geológicamente, en la zona alta de la cuenca existen rocas metamórficas poco erosionables que al meteorizarse se disgregan en suelos arcillosos que son arrastrados por las lluvias. En la parte media existe una llanura aluvial limitada por rocas precambricas metamórficas. Según MINAM (2017) La parte baja de la cuenca posee una llanura aluvial que conforma el acuífero Zarumilla. En cuanto a la cobertura del suelo, la parte alta de la cuenca posee una leve intervención, manteniendo las características naturales de la misma. En la zona media la intervención es mayor, pero se conserva vegetación y áreas boscosas naturales. Pasando la zona media existen cultivos de arroz, plátano, pimientos, cítricos, entre otros. La parte baja es totalmente intervenida. El índice poblacional en la cuenca es bajo, y existen pocas poblaciones, sobresaliendo en Ecuador la ciudad de Huaquillas y pequeños pueblos como Chacras, Balsalito, Huabillo, Bocana y Palmales; En Perú la ciudad de Aguas Verdes, y poblados pequeños como Papayal, Uña de Gato, Cuchareta Alta, Cuchareta Baja, Porvenir, Pocitos y Matapalo.

2.1.3 Características climáticas.

Según INHAMI (2011), el clima de la cuenca puede definirse como subdesértico tropical, debido a que se encuentra en la zona de transición entre el clima árido del Perú al clima húmedo del Ecuador. Durante el periodo seco, comprendido entre junio y diciembre las temperaturas medias van de 19.0 °C a 25.0 °C. En temporada lluviosa, comprendida de diciembre a mayo, las temperaturas medias van de 25.9 °C a 26.5 °C. El promedio anual se encuentra alrededor de 24.5 °C. No obstante, cuando las condiciones térmicas son afectadas por el fenómeno de El Niño, la temperatura ha llegado a máximos diarios de 35° C y 36° C. Adicionalmente, la humedad relativa en la zona posee valores que fluctúan alrededor del 85%, con un valor promedio de 86.6%, un valor máximo de 87.6% en octubre y un mínimo de 85.6% en diciembre.

2.1.4 Características de precipitación.

La variación de precipitación en la zona es amplia, por lo que se distinguen periodos de sequía y grandes precipitaciones. Esto se debe al movimiento variable de las corrientes de Humboldt y el Niño. La temporada lluviosa coincide con la presencia de la corriente de El Niño, iniciándose en

el mes de diciembre. Las precipitaciones medias anuales se encuentran alrededor de 150 mm al año en la parte baja, 700mm en la parte media y hasta 1080 mm en la parte alta. Durante la temporada seca los valores de lluvia son nulos (INAMHI, 2011).

2.1.5 Características hidrométricas.

Debido a las precipitaciones estacionarias, se considera al río Zarumilla como un cauce intermitente. El sector La Palma, donde se encuentra la Bocatoma del Canal Internacional, se registra caudales medios en época lluviosa de 6 m³/s sin considerar el fenómeno de El Niño, durante el cual los caudales poseen un valor medio de 11 m³/s, alcanzando sus valores máximos en los meses de febrero y marzo (INAMHI, 2011).

2.2 Recopilación de información.

Para la ejecución del proyecto, es necesaria la recopilación de información topográfica, meteorológica, climática, hidrológica, de uso y tipo de suelo existente para la cuenca del río Zarumilla.

La topografía del sector se obtuvo de un modelo de elevación digital de resolución de 30m del proyecto SRTM, llevado a cabo por el USGS y la NASA (NASA & USGS, 2016). La información hidrológica utilizada para la calibración del modelo se obtiene de los datos de caudales máximos instantáneos anuales de la estación La Palma, en la zona peruana de la cuenca, la cual se encuentra en las coordenadas 587602 m E y 9606643 m S (INAMHI, 2011).

La información de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca se tomó de los mapas disponibles en el geoportal del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2017) para la zona ecuatoriana, mientras que para la zona peruana, la información de uso y tipo de suelo se tomó del portal de mapas de cobertura vegetal del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2017).

Para el tránsito de caudales se determinó el ancho del cauce principal en los tramos entre uniones con los cauces de aporte de caudal utilizando imágenes de satélite obtenidas de Google Earth.

2.3 Delimitación de la cuenca del río Zarumilla.

Según la Autoridad Nacional del Agua de Perú, la cuenca del río Zarumilla se compone de 8 subcuencas o unidades hidrográficas, las cuales se muestran en la tabla 1 y se pueden visualizar en la figura 2.

Código	Nombre
139341	Intercuenca Zarumilla 139341
139342	Cuenca Lomillo
139343	Intercuenca Zarumilla 139343
139344	Cuenca Palmales
139345	Intercuenca Zarumilla 139345
139346	Cuenca Quebrada Seca
139347	Intercuenca Zarumilla 139347
139348	Cuenca Hondonada
139349	Intercuenca Zarumilla 139349

Tabla 1: Unidades hidrográficas del Río Zarumilla.

Fuente: (ANA, 2014) Elaboración: (ANA, 2014)



Figura 2: Cuenca del río Zarumilla con sus respectivas subcuencas. Fuente: (Secretaría del Agua & ANA, 2013) Elaboración: (Secretaría del Agua & ANA, 2013)

Para realizar la delimitación de la cuenca del Río Zarumilla, se utilizó el archivo raster obtenido de la página del SRTM con un tamaño de píxel de 30m (figura 3) y el complemento HEC-GeoHMS

para GIS, para así obtener la cuenca y subcuencas que la componen, además de la identificación de la red hidrográfica.



Figura 3: Imagen raster de la zona de estudio. Fuente: (NASA & USGS, 2016) Elaboración: (NASA & USGS, 2016)

2.3.1. Pre procesamiento del terreno HEC-GeoHMS.

El pre procesamiento del terreno se realizó con el fin de generar la red fluvial de las cuencas existentes en el raster disponible y las subcuencas que las componen, además de la generación de varias capas que se utilizan para la creación del proyecto. El pre procesamiento incluye las siguientes funciones, según (USACE, 2016):

- Relleno de depresiones: Esta función permite corregir los pixeles que poseen una elevación inferior a la de las celdas contiguas, inhibiendo el flujo del agua.
- Direccionamiento de flujo: Permite definir la dirección del flujo según cual sea el descenso más pronunciado para cada pixel. Como una brújula, el flujo puede seguir ocho direcciones posibles: este, sureste, sur, suroeste, oeste, noroeste, norte o noreste.
- Acumulación de flujo: Permite determinar el número de celdas aguas arriba que drenan a una celda dada.

- Definición de corrientes: Permite clasificar a todas las celdas con acumulación de flujo como celdas pertenecientes a la red de flujo.
- Segmentación de corrientes: Permite dividir la cuadrícula de flujo en segmentos de corriente o enlaces, que son las secciones de una corriente que conectan dos uniones sucesivas, una unión y una salida, o una unión y la división de drenaje.
- Definición de cuencas: Permite delinear una subcuenca para cada segmento de flujo.
- Procesamiento poligonal de la cuenca: Permite crear una capa vectorial de subcuencas utilizando la cuadrícula de definición de cuencas.
- Procesamiento de la red de drenaje: Permite crear una capa vectorial de flujo.
- Agregación de las cuencas: Este paso agrega las subcuencas aguas arriba en cada confluencia de corrientes.

2.3.2. Procesamiento de la cuenca.

Con las capas anteriormente mencionadas se delimitó la cuenca, estableciendo el punto de salida en el cauce principal. Para la cuenca Zarumilla, el punto de salida se estableció en el puente Bolsico sobre el río Zarumilla, en las coordenadas 583506 m E y 9615080 m S. El procesamiento también incluyó la unión de varias subcuencas pequeñas, obteniéndose un total de 9 subcuencas, para que exista concordancia con la división de subcuencas del Plan Binacional de Desarrollo de la Región Fronteriza.

2.3.3. Características de la cuenca.

Para la generación del modelo hidrológico, fue necesario definir algunos parámetros para cada una de las subcuencas, los cuales son: longitud y pendiente del cauce, pendiente de la cuenca, trayecto más largo de flujo, centroide de la cuenca y elevación del cetroide. Cada uno de estos parámetros fue calculado por el complemento HEC-GeoHMS y añadido a una tabla de atributos por el programa. Además, se asignó el nombre a cada río y cuenca, usando el mismo complemento.

2.3.4. Procesamiento HMS.

Para crear un archivo que sea compatible con el software HEC-HMS (extensión .basin) se estableció las unidades a utilizarse (en este caso unidades del Sistema Internacional). Posteriormente se generó el esquema HMS, el cual es una representación física de la cuenca,

conformada por elementos conectados en una red dendrítica para simular el proceso de escorrentía. Estos elementos son reservorio, empalme, desvío, fuente y sumidero.

Una vez generado el esquema, se prepararon los datos para la exportación del modelo y se generaron los mapas de las subcuencas y los ríos a usarse como fondo en el software HEC-HMS, para finalmente crear el proyecto con el que se comenzó la modelación.

2.4 Características físico-morfométricas

2.4.1. Tiempo de retardo.

Para la determinación del tiempo de retardo para cada una de las subcuencas, se utilizaron cuatro metodologías: Kirpich, Giandotti, Temez y Passini.

2.4.1.1. Determinación de información usada en el cálculo.

Para la aplicación de estos métodos, es necesario disponer de información de los cauces y subcuencas del área de estudio. La longitud y pendiente media del cauce pueden obtenerse de la tabla de atributos generada durante la determinación de las características de la cuenca, pero en este caso, se obtuvo generando el perfil de cada uno de los cauces mediante la herramienta 3D analyst. El área de las subcuenca se obtuvo de los atributos.

2.4.2. Determinación del tiempo de retardo mediante Kirpich.

Según Chow (1994), la formulación del tiempo de retardo dada por Kirpich se expresa según la ecuación 1.

$$T_c = 0.0663 \times L^{0.77} S^{-0.385} \tag{1}$$

En donde:

T_c: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce principal (Km)

S: Pendiente media del cauce (m/m)

2.4.3. Determinación del tiempo de retardo mediante Giandotti.

El tiempo de retardo por Giandotti se calcula con la ecuación 2 (Chow, 1994).

$$T_c = \frac{4 \times \sqrt{A} + \frac{3}{2}L}{25.3 \times \sqrt{S \times L}}$$
(2)

En donde: Tc: Tiempo de concentración (h) A: Área de la cuenca (km²) L: Longitud del cauce principal (Km)

S: Pendiente media del cauce (m/m)

2.4.4. Determinación del tiempo de retardo mediante Temez.

Según Aparicio (1992), la ecuación 3 se utiliza para calcular el tiempo de retardo según Temez.

$$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$$
(3)

En donde:

T_c: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce principal (Km)

S: Pendiente media del cauce (%)

2.4.5. Determinación del tiempo de retardo mediante Passini.

El tiempo de retardo según Passini se calcula mediante la ecuación 4 (Aparicio, 1992).

$$T_c = 0.108 \times (A \times L)^{\frac{1}{3}} \times S^{-0.5}$$
⁽⁴⁾

En donde:

T_c: Tiempo de concentración (h)

A: Área de la cuenca (km²)

L: Longitud del cauce principal (Km)

S: Pendiente media del cauce (m/m)

2.5 Número de la curva.

El Soil Conservation Service (SCS, Runoff Curve Number Calculation, 1989) desarrolló un procedimiento para obtener la precipitación efectiva o la lámina que produce escorrentía superficial directa, la cual se obtiene de la fórmula 5.

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$
(5)

En donde Pe es la precipitación efectiva, P es la profundidad de precipitación y S es la retención potencial máxima. (Aparicio, 1992)

La retención se expresa mediante el parámetro adimensional denominado Número de la Curva, mediante la ecuación 6.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$
 (6)

En donde CN es el Número de la Curva que va de 1 a 100, según el tipo de suelo, la humedad antecedente, la ocupación del suelo, la condición hidrológica y la existencia de práctica de conservación (Aparicio, 1992).

2.5.1. Tipo de suelo.

Según el Soil Conservation Service (SCS, Runoff Curve Number Calculation, 1989), se puede clasificar a los suelos en cuatro grupos hidrológicos, como se puede apreciar en la tabla 2:

Tipo de suelo	Condición	Textura del suelo
A		Bajo potencial de escurrimiento, con un
	Muy	porcentaje mayoritario de arena (90%).
	permeable	Incluyen arenas muy profundas y arenas con
		poco limo y arcilla.
В		Potencial de escurrimiento moderadamente
		bajo. Arenas finas bajo con contenido de
	Permeable	arcilla y limos. Comprende además suelos
		franco arenosos y franco limosos con
		moderada profundidad.

Tipo de suelo	Condición	Textura del suelo
С	Impermeable	Potencial de escurrimiento moderadamente alto. Suelos con alto contenido de arcilla
		(hasta un 40%) y menos de un 50% de arena
		(hasta un 40%) y menos de un 50% de arena.
		incluye suelos franco limosos, franco arcilio
		arenosos, franco arcillosos, y limosos.
D	Muy Impermeable	Alto potencial de escurrimiento. Arcillas en
		grandes cantidades (más de un 40%), texturas
		arcillosas.

Fuente: (FAO, 2006) Elaboración: (FAO, 2006)

2.5.2. Uso de suelo.

El SCS clasifica a la ocupación del suelo en 4 grupos: agrícola, pastizal, forestal y urbano. Para determinar la cobertura del suelo se utilizó mapas de uso del suelo, disponibles en la página del MAGAP (2017).



Figura 4: Tipo de suelo zona de estudio. Fuente: (MAGAP, 2017) Elaboración: (MAGAP, 2017)


Figura 5: Uso de suelo cuenca Zarumilla. Fuente: (MAGAP, 2017) Elaboración: (MAGAP, 2017)

Los principales usos de suelo para la zona de estudio son los siguientes:

- Pasto Cultivado.
- Bosque.
- Arboricultura Tropical.
- Vegetación Arbustiva.
- Vegetación Herbácea.
- Uso Urbano.

2.5.3. Condición hidrológica.

Según el SCS (1989), la condición hidrológica se estima según la densidad que posee la cobertura del suelo en la zona de interés, para definir el efecto que tendrá sobre la infiltración y la escorrentía.

Según el porcentaje del área cubierta se tiene que si:

- La cobertura es < 50%, la condición hidrológica es mala.
- La cobertura es de 50% a 75%, la condición hidrológica es regular.

• La cobertura es > 75%, la condición hidrológica es buena.

Para análisis de los valores del número de la curva se optó por asumir la condición hidrológica de la cuenca como regular, debido al tipo de cobertura existente a lo largo de la cuenca. Una vez que se define el tipo y uso de suelo y la condición hidrológica se puede utilizar las tablas disponibles para determinar el número de la curva según las condiciones que se presenten. Debido a que cada una de las subcuencas posee varios tipos de suelo y varias coberturas, se ponderó los valores de CN con respecto al área de cada una de las condiciones particulares.

2.5.4. Humedad antecedente.

La humedad antecedente (AMC) es el contenido de humedad que posee un suelo al momento de producirse un evento de estudio, y toma en cuenta la cantidad de lluvia caída en la cuenca durante los 5 días anteriores al evento mencionado (Aparicio, 1992). De este modo, se tiene que la humedad antecedente es:

AMC I para suelos secos, $(P_5) < 2.5$ cm

AMC II para suelos intermedios, 2.5 cm < (P₅) < 5 cm

AMC III para suelos húmedos, $(P_5) > 5 \text{ cm}$ (Chow, 1994)

Los valores de CN para varios usos y tipos de suelo presentados por el SCS son expresados para una condición antecedente de humedad intermedia AMC II, por lo que se puede corregir el CN para condiciones AMC I con la ecuación 7 o AMC III con la ecuación 8.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$
(7)

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$
(8)

El software HEC-HMS considera para el modelo el número de la curva la humedad antecedente de un suelo intermedio, por lo que el CN no se corrigió al momento de implementar el modelo.

2.6 Tormentas de diseño.

Según Allado & Fuentes (2009) las tormentas de diseño son escenarios de precipitación para diferentes duraciones y periodos de diseño, que se utilizan para el estudio de la respuesta hidrológica de la cuenca. Para la obtención de caudales, estas tormentas representan los datos de entrada en un diseño hidrológico, como se puede observar en la figura 6.

Datos de Entrada

Lluvia-escorrentía

Tormenta de Diseño

Tránsito de caudales

&

Datos de Salida

Caudales

Figura 6: Esquema de diseño hidrológico. Fuente: (Allado & Fuentes, 2009) Elaboración: (Allado & Fuentes, 2009)

En el presente estudio, para la determinación de las tormentas de diseño se ha tomado como referencia las ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación dispuestas por el INHAMI (INHAMI, Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación, 2015), el cual, permite el cálculo de las intensidades máximas de precipitación en 24 horas de las estaciones pluviográficas del Ecuador, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años y para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 360 y 1440 minutos.

Este informe del INHAMI proporciona la zonificación de intensidades de precipitación para las estaciones pluviográficas, como se muestra en la figura 7.

Debido a que la cuenca de interés se encuentra entre la provincia de El Oro en Ecuador y Tumbes en Perú, se ha utilizado la zonificación de intensidades correspondiente a la demarcación del Jubones, como se muestra en la figura 8.

La zonificación mencionada corresponde a tres estaciones pluviográficas que tienen una influencia directa en el área de estudio, las cuales se presentan en la tabla 3.

Estación	Machala Aeropuerto	Zaruma	Celica
Latitud	615178	654213	616393.3
Longitud	9638811	9591035.4	9546220.8
Polígono Nro.	37	54	50
Area (km²)	289.4	48.8	537.3

Tabla 3: Estaciones pluviográficas disponibles en la zona de interés

Fuente: (INHAMI, 2015)

Elaboración: (INHAMI, 2015)



Figura 7: Zonificación de intensidades de precipitación. Fuente: (INHAMI, 2015) Elaboración: (INHAMI, 2015)



Figura 8: Zonificación de intensidades de precipitación demarcación Jubones. Fuente: (INHAMI, 2015) Elaboración: (INHAMI, 2015)

Debido a la regularidad que posee la zona de estudio en cuanto al relieve, y a la carencia de datos en la zona peruana de la cuenca, se ha optado por asumir que los polígonos de Thiessen de cada una de las estaciones abarcan también el área de la cuenca ubicada en Perú, como muestra la figura 9. Para cada una de las zonas, se utilizaron las ecuaciones de intensidad desarrolladas por el INHAMI (2015), las cuales se presentan a continuación:

Zona	Estación	Duración	Ecuación	R ²
37	Machala	5 min < 51.4 min	$I_{TR} = 49.64 \times Id_{TR} \times t^{-0.296}$ (9)	0.9606
	Aeropuerto	51.4 min < 1440 min	$I_{TR} = 370.3 \times Id_{TR} \times t^{-0.806}$ (10)	0.9965
50	Celica	5 min < 42.98 min	I _{TR} = 80.137×Id _{TR} ×t ^{-0.455} (11)	0.9955
		42.98 min < 1440 min	$I_{TR} = 235.8 \times Id_{TR} \times t^{-0.724}$ (12)	0.9929
54	Zaruma	5 min < 72.71 min	I _{TR} = 71.544×Id _{TR} ×t ^{-0.406} (13)	0.9685
		72.71 min < 1440 min	I _{TR} = 448.05×Id _{TR} ×t ^{-0.834} (14)	0.9945

Tabla 4: Ecuaciones de intensidad para cada zona de influencia.

Fuente: (INHAMI, 2015)

Elaboración: (INHAMI, 2015)

En donde:

I_{TR}: Intensidad máxima para una duración de tiempo n para un periodo de retorno dado (mm/h) Id_{TR}: Intensidad máxima diaria para un periodo de retorno dado (mm/h) ti Duración de llunia (min)

t: Duración de lluvia (min)

El valor de Id_{TR} se determinó con ayuda de los mapas de intensidades máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno que se presentan en el informe del INHAMI, los cuales son mapas de isoyetas para todo el territorio ecuatoriano, como se puede apreciar en la figura 10.

Según la duración y periodo de retorno considerado, se obtuvo una intensidad máxima para cada una de las zonas de intensidad (3), por lo que se ponderó estas intensidades según el área de cada polígono de Thiessen.



Figura 9: Estaciones pluviométricas y zonas de intensidad. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que los datos de interés que se requieren para armar el modelo son de precipitación, se convirtió la intensidad en precipitación, con la fórmula de intensidad, correspondiente a la ecuación 15 (Chow, 1994).

$$P = I \times t \tag{15}$$

En donde: P: Precipitación (mm) I: Intensidad (mm/h) t: duración de la tormenta (h).



Figura 10: Intensidades máximas en 24 horas para un TR de 2 años. Fuente: (INHAMI, 2015) Elaboración: (INHAMI, 2015)

2.7 Relaciones Iluvia – escorrentía.

El modelo propuesto de la cuenca utilizó el método del hidrograma unitario del SCS. Este método utiliza el hidrograma unitario triangular, como el que se muestra en la figura:



Figura 11: Hidrograma unitario triangular Fuente: (UNNE, 2001) Elaboración: (UNNE, 2001)

En este método, el caudal pico se determina mediante la ecuación 16.

$$q_p = \frac{0.208 \times A}{t_p} \tag{16}$$

En donde: A: Área de la cuenca (km²) t_p : Tiempo pico (h) q_p : Gasto pico (m³/s/mm)

El tiempo pico puede determinarse mediante la ecuación 17.

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \tag{17}$$

En donde: d_e: Duración en exceso (h) t_r: Tiempo de retraso (h)

La duración en exceso y el tiempo de retraso dependen del tiempo de concentración de la cuenca, y se pueden calcular con las ecuaciones 18 y 19.

$$t_r = 0.6 \times t_c \tag{18}$$

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \tag{19}$$

En donde: t_c: Tiempo de concentración (h)

Finalmente, el tiempo base t_b se calcula con la ecuación 20.

$$t_b = 2.67 \times t_p \tag{20}$$

El hidrograma adimensional del SCS expresa el caudal q con respecto al caudal pico qp y el tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario tp.



Figura 12: Hidrograma unitario adimensional del SCS Fuente: (UNNE, 2001) Elaboración: (UNNE, 2001)

2.8 Tránsito de caudales.

Debido a que el cauce principal de la cuenca (Río Zarumilla) posee varios aportes a lo largo de su longitud, es importante tomar en cuenta el tránsito de caudales, el cual en el modelo se calculó mediante el método de Muskingum-Cunge, que se explica a continuación considerando la figura 13. Se asume que la precipitación es uniforme en toda la cuenca, con lo que la subcuenca nro. 10 genera su hidrograma respuesta en el punto de salida de dicha subcuenca (A). El hidrograma se transita a lo largo de la longitud AB. En el punto (B) se unen tres hidrogramas: el transitado, el producido por la subcuenca 20 y el correspondiente al de la subcuenca 30. Este hidrograma se transita a su vez a lo largo del tramo BC, para llegar a la salida de la cuenca (C) en donde se suma el aporte de la cuenca 40 (Diez, 2010).



Figura 13: División de una cuenca y esquema hidrológico. Fuente: (Diez, 2010) Elaboración: (Diez, 2010)

El modelo HEC-HMS realiza el cálculo del tránsito de caudales, que como explica Sanchez (2009), considera la ecuación 21, que puede aplicarse a cada tramo del cauce principal Δx para cada Δt :

$$O^{j} = C_{1}I^{j-1} + C_{2}I^{j} + C_{3}O^{j-1} + C_{4}(q\Delta x)$$
⁽²¹⁾

En donde:

O: Descarga de salida (m³/s)
Cn: Coeficientes del método.
J: paso de tiempo.
q: Caudal unitario (m³/s/m).
Δx: Diferencia de distancia (m).
I: Caudal medio de entrada (m³/s).

Los coeficientes pueden ser calculados con las siguientes expresiones:

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)};$$
(22)

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)}$$
(23)

$$C_{3} = \frac{2(1-X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$
(24)

$$C_4 = \frac{2\frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$
(25)

En donde los coeficientes K y X se calculan con:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \tag{26}$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{cBS_0 \Delta x}\right) \tag{27}$$

En donde:
Δt: Diferencia de tiempo (d).
c: Celeridad de la onda (m/s).
Q: Caudal (m³/s)
B: Ancho del cauce (m)
So: Pendiente del cauce (m/m)

2.9 Implementación del modelo.

La modelación de la cuenca necesita de la introducción de los componentes fundamentales para la generación del modelo de lluvia escorrentía, como son el modelo topológico de la cuenca y el modelo meteorológico, además de la calibración del mismo.

La generación de los hidrogramas de crecida como resultado de la modelación de la cuenca, requieren del proceso que se ilustra en la figura 14:



Figura 14: Flujograma para la modelación de la cuenca Fuente: Elaboración propia.

2.1.6 Modelo topológico de la cuenca.

El cual se generó con uso del complemento para GIS HEC-GeoHMS, como se explicó en el apartado 2.3.1. Este modelo contiene las subcuencas y la red hidrográfica con sus respectivas características generadas con dicho complemento (Área de las subcuencas, longitud, y pendiente del cauce principal).

El modelo topológico requiere además de la introducción de valores previamente calculados, como el tiempo de retraso y el número de la curva, además de otros valores como la pendiente lateral en la sección transversal del cauce, la cual se asumió como 0.5 para todo el cauce principal, como un promedio de los taludes observados en la zona de estudio, el ancho del cauce que fue medido en las imágenes satelitales obtenidas de Google Earth y el n de Manning, que se determinó mediante la comparación fotográfica de la zona de estudio e imágenes cuyo valor de n es ya conocido, como se muestra en la figura 15, la cual muestra en la izquierda el cauce del río Zarumilla en coordenadas 590497 m E y 9586451 m S, comparándola con una imagen tomada de Cache Creek, cuyo valor de n va de 0.053 a 0.079 (UBC, 2000).



Figura 15: Determinación del N de Manning por comparación de fotografías. Fuente: (UBC, 2000) Elaboración: (UBC, 2000)

2.9.2 Modelo meteorológico.

El modelo meteorológico que se escogió fue una tormenta de frecuencia, definida para los tres periodos de retorno considerados: 25, 50 y 100 años, tormentas que se han considerado de duración anual (la tormenta más fuerte en un año), para un intervalo de duración de 15 minutos y un valor estimado de duración de tormenta de 6 horas. Los valores de precipitación son aquellos calculados como indica el literal 2.6.

2.9.3 Consideración de la bocatoma La Palma como embalse.

En el cauce del río Zarumilla se encuentra la bocatoma La Palma, la cual es una obra hidráulica que deriva un caudal de 4.5 m³/s al Canal Internacional. Posee un perfil Creager de 80.5 m de longitud de una orilla del cauce a la otra, con una altura de 2m desde el fondo y un área de inundación de aproximadamente 51744m² (INHAMI, Estudio Hidrológico de Caudales Máximos y Levantamiento de Información Ambiental en la Cuenca del Río Zarumilla, 2005).

Dicha obra se considera en el modelo como un reservorio, el cual requiere información de almacenamiento y descarga, en donde la descarga será 0 mientras la altura del agua sea menor a la altura del barraje fijo.

El almacenamiento es el volumen de agua retenida por el barraje fijo, el cual al ser un perfil Creager, utiliza para calcular la descarga mediante la fórmula de Francis (SAGARPA, Obras de excedencias, 2012)

$$Q = C \times L \times H^{\frac{3}{2}}$$
(28)

En donde: Q: Gasto (m³/s) C: Coeficiente del vertedero (C=2) L: Longitud de la Cresta (m) H: Carga de diseño (m)

2.9.4 Calibración del modelo.

El modelo se calibró considerando datos históricos de máximas avenidas en la zona de estudio. En la cuenca del río Zarumilla existe una estación hidrométrica en la bocatoma Las Palmas, en las coordenadas 587602 m E y 9606643 m S, estación de la cual se dispuso de 16 años de datos de caudales máximos. Debido a que se definió al puente Bolsico como la salida de la cuenca, y la bocatoma La Palma se encuentra a alrededor de 13km aguas arriba de dicho puente, para la calibración del modelo de la cuenca completa se realizó un segundo modelo, en donde la Intercuenca Zarumilla 139341 cerrara a la altura de la bocatoma, para obtener los caudales calibrados en dicho punto y posteriormente extrapolar la configuración a la zona restante de la cuenca.

Para la calibración del modelo se realizó un análisis de frecuencias para los caudales máximos registrados en la estación hidrométrica La Palma, utilizando el software CHAC, por distribución normal, Gumbel, SQRT y distribución Generalizada de Valor Extremo (GEV), seleccionando como la metodología a emplear aquella que brinde un mejor ajuste de datos.

El tipo de ajuste aplicado a las distribuciones de probabilidad según el método es mediante momentos, momentos ponderados probabilísticamente y máxima verosimilitud. Estos ajustes permiten resumir los datos de muestra en forma compacta en una función y sus parámetros (Chow, 1994). Las expresiones de los métodos más empleados para la distribución de frecuencias y sus correspondientes tipos de ajustes se muestran en la tabla 5 (CEDEX, 2013):

41

Tabla 5: Leyes de Frecuencia

Nombre	Función	Tipo de Ajustes Posibles
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} $ (29)	Momentos
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \times e^{\left(-\frac{x-\mu}{\alpha} - e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}\right)} $ (30)	Momentos Máxima verosimilitud Momentos ponderados probabilísticamente
SQRT	$f(x) = e^{-k \times (\sqrt{\alpha \times x} * e^{-\sqrt{\alpha \times x}})} $ (31)	Máxima verosimilitud
Log Pearson III	$f(x) = \frac{1}{\alpha^{r} \times \Gamma(r)} * (x - \mu)^{r-1} \times e^{-\frac{x - \mu}{\alpha}} $ (32)	Individual con sesgo muestral
GEV	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \times \left(1 - k \times \frac{x - \mu}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k} - 1} \times e^{-\left(1 - k \times \frac{x - \mu}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}}} (33)$	Momentos Máxima verosimilitud Momentos ponderados probabilísticamente

Fuente: (CEDEX, 2013) Elaboración: (CEDEX, 2013)

Siendo para todas ellas:

α: Parámetro de escala.

k: Parámetro de forma.

μ: Factor de localización.

2.10 Escenario de cambio de uso de suelo.

Para determinar la ocupación futura del suelo en la cuenca de estudio, 2027 como año de horizonte, se utilizó el software TerrSet, específicamente la función de Land Change Modeler, la cual es una herramienta secuencial que permite generar gráficos y mapas de cambio de uso de suelo. Para la producción de mapas a futuro, es necesario contar con al menos dos mapas de ocupación de suelo, de dos fechas distintas (Eastman, 2016). Para el presente estudio, se utilizó dos mapas disponibles de la zona de estudio en los años 2014 y 2017.

Debido a que la clasificación original de ambos mapas presentaba un número muy elevado de categorías temáticas, se realizó una reclasificación a los 8 grupos generales de cobertura de la zona de estudio: Bosque, centro poblado, vegetación arbustiva, manglar, cuerpo de agua, pasto, erial y cultivos, los cuales comprenden en su gran mayoría árboles frutales.



Figura 16: Uso de suelo de la zona de estudio. Fuente: (MAGAP, 2017) Elaboración: (MAGAP, 2017)

Las variables consideradas para la generación del escenario de cambio de uso de suelo fueron tres: el modelo digital de elevación, que condiciona la presencia de especies vegetales y limita las tareas agrícolas, y la distancia a carreteras y poblados, que son factores humanos que producen un impacto en las condiciones naturales de vegetación. Según como sea la variación de un año al otro en el uso del suelo en la zona de estudio, se generan un número de submodelos

igual al número de transiciones de un tipo de cobertura a otro. A cada submodelo de transición se le asignó las tres variables explicativas mencionadas anteriormente.

Los submodelos de transición pueden calcularse con la herramienta Land Change Modeler aplicando regresión logística o mediante una red neuronal de perceptrones multicapa (MLP), para así obtener la probabilidad de ocurrencia de cada transición. En el presente estudio se aplicó redes neuronales, que son un conjunto de elementos simples que se distribuyen en capas, las cuales se conectan entre sí mediante funciones de activación, que se definen mediante una serie de pesos calculados por aprendizaje. Estos pesos van variando entre las interacciones siguiendo el algoritmo de *back propagation* (Muñoz, 2009). El aprendizaje tiene como objetivo estimar los resultados conocidos, en este caso las transiciones observadas, mediante los datos de entrada (las variables explicativas), para posteriormente calcular resultados desconocidos (transición a futuro) a partir del resto de los datos de entrada (Vílchez, 2010). El proceso de una red neuronal puede visualizarse en la figura 17 propuesta a continuación:



Figura 17: Estructura general de una red neuronal. Fuente: (Vílchez, 2010) Elaboración: (Vílchez, 2010)

El modelamiento de cambio de uso de suelo hacia un año horizonte se realizó aplicando cadenas de Markov. Este procedimiento se basa en el conocimiento del estado en el presente de un sistema y su probabilidad de transición. Por ello, el software utiliza el mapa de uso de suelo ingresado con fecha más reciente (2017) y la matriz de probabilidad de transición calculada con anterioridad mediante redes neuronales, para determinar las zonas que experimentarán una transición desde la fecha final (2017) hasta la fecha del escenario generado (2027) (Eastman, 2016).

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Modelo HEC-HMS.

3.1.1 Delimitación de la cuenca.

La cuenca del río Zarumilla cuenta con 9 subcuencas, como se describió en el apartado 2.3. La delimitación realizada con el complemento HEC-GeoHMS para la cuenca completa se muestra en la figura 18, en la cual se puede apreciar además el esquema HMS generado, que cuenta con la red dendrítica, los empalmes, el reservorio y el sumidero ubicado en el puente Bolsico, correspondientes a la cuenca de estudio.



Figura 18: Esquema HMS cuenca Zarumilla. Fuente: Elaboración propia.

Para la calibración del modelo, como se detalla en el apartado 2.9.3, se realizó otra delimitación de la cuenca hasta la bocatoma La Palma, punto en donde se encuentra la estación hidrométrica del mismo nombre, como se muestra en la figura 19:



Figura 19: Esquema HMS cuenca Zarumilla hasta bocatoma la Palma. Fuente: Elaboración propia.

Las subcuencas fueron renombradas para el trabajo con el software HEC-HMS, por lo que se muestra en la tabla 6 los nombres de las subcuencas para cada código mostrado en la figura 18:

Código HMS	Nombre Cuenca
W500	Intercuenca Zarumilla 139341
W520	Intercuenca Zarumilla 139343
W540	Intercuenca Zarumilla 139345
W620	Intercuenca Zarumilla 139347
W740	Intercuenca Zarumilla 139349
W760	Hondonada
W950	Lomillo
W960	Quebrada Seca
W1130	Palmales

Tabla 6: Nombres de subcuencas y códigos usados en HMS.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Parámetros de las subcuencas.

El área, número de la curva y tiempo de concentración mediante Kirpich, calculado para cada cuenca se muestran en la tabla 7.

Código HMS	Área (km²)	Tiempo de Concentración (min)	CN
W500 (Cuenca Completa)	121.7	236.2	73
W500 (Calibración)	45.1	118.8	68
W520	25.2	171.0	66
W540	12.5	73.9	67
W620	24.4	217.2	61
W740	162.5	325.8	78
W760	38.7	167.2	64
W950	100.3	218.9	57
W960	139.3	281.7	61
W1130	250.1	277.4	70

Tabla 7: Parámetros de las subcuencas de la cuenca Zarumilla.

Fuente: Elaboración propia.

Las subcuencas Hondonada y Quebrada Seca, y parte de las subcuencas Intertercuenca Zarumilla 139347 y Lomillo forman parte de la Reserva Nacional de Tumbes, la cual comprende una gran extensión de bosque tropical y bosque seco. Razón por la cual los valores estimados de CN están alrededor de 60, que indica que existe un mayor grado de infiltración que de escurrimiento.

El tiempo de concentración utilizado para el modelo fue aquel calculado mediante Kirpich, el cual presentaba valores de orden medio, comparados a los obtenidos por los otros métodos. El valor más grande en minutos de tiempo de concentración es el que corresponde a la intercuenca Zarumilla 139349, lo cual es acorde al hecho de que el tramo de cauce más extenso de todas las cuencas es aquel que se encuentra en esta intercuenca, considerando Kirpich como parámetros de cálculo la longitud y pendiente media del cauce. Por esta misma razón, la intercuenca

Zarumilla 139345 es la que tiene el menor tiempo de concentración, dado que es la más pequeña de las subcuencas.

3.1.3 Parámetros de los tramos entre aportes de caudal al cauce principal.

El cauce del río Zarumilla posee 7 aportes de caudal desde la zona alta de la cuenca hasta el punto de salida en el puente Bolsico. Las características de los tramos entre los aportes de caudal se detallan en la la tabla 8.

Tramo de	Longitud	Pendiente	N Manning	Ancho de
Río	(m)	(m/m)	Nimanning	fondo (m)
R280	9714	0.0010	0.053	35
R150	3509	0.0026	0.053	14
R90	5111	0.0006	0.042	38
R60	1614	0.0012	0.038	36
R40	2378	0.0034	0.038	46
R30	5732	0.0020	0.034	84
R20	7524	0.0010	0.034	105
R10	4770	0.0010	0.03	105

Tabla 8: Parámetros de los tramos de río entre aportes de caudal.

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente n de Manning pasa de un valor de 0.053 en el tramo de cauce ubicado en la parte alta de la cuenca, a un valor de 0.03 en el tramo más cercano a la salida de la cuenca, esto se debe a que la parte alta de la cuenca posee características de río de montaña, con cama y bancos de canto rodado y árboles y arbustos a lo largo de la parte superior, mientras que en el último tramo antes de la salida del puente Bolsico, existen diques en ambas orillas del cauce.

3.1.4 Tormentas de diseño.

Las tormentas de diseño fueron calculadas con las ecuaciones de intensidades máximas de precipitación dispuestas por el INHAMI, ponderando dichas intensidades según el área de influencia de los polígonos de Thiessen, para los tres periodos de diseño considerados como se muestra en la tabla 9.

Tabla Q.	Tormontas da	diseño nar	a distintos	neriodos	de retorno
i abia 9.	Tonnenias de	uiserio par	a uistintos	penouos	de relonio.

Po	lígono	37	54	50	Ponderado para cuenca total	
Å	rea	289.4	48.8	537.3		
Est	tación	Machala	Zaruma	Celica		
					Intensidad	
TR	t (min)	Intens	idad Máxima ((mm/h)	Máxima	Precipitación
	. ()	interio		(Ponderada	(mm)
					(mm/h)	
	5	200.378	231.181	241.938	227.602	18.967
	15	144.751	140.237	154.879	150.716	37.679
	60	88.772	67.812	88.218	87.264	87.264
25	120	50.775	40.545	53.728	52.018	104.035
25	180	36.620	30.011	38.313	37.291	111.872
	360	20.945	17.944	21.492	21.114	126.683
	720	11.980	10.729	12.057	11.957	143.488
	1440	6.852	6.415	6.763	6.773	162.560
	5	215.792	269.712	260.549	246.266	20.522
	15	155.886	163.610	166.793	163.011	40.753
	60	95.601	79.114	95.004	94.316	94.316
50	120	54.680	47.303	57.861	56.222	112.443
50	180	39.437	35.013	41.260	40.309	120.928
	360	22.557	20.935	23.146	22.828	136.966
	720	12.902	12.517	12.984	12.931	155.169
	1440	7.379	7.484	7.284	7.326	175.834
	5	246.619	308.242	297.770	281.447	23.454
	15	178.155	186.983	190.621	186.298	46.574
	60	109.258	90.416	108.576	107.790	107.790
100	120	62.492	54.061	66.127	64.253	128.507
100	180	45.071	40.015	47.154	46.068	138.203
	360	25.779	23.925	26.452	26.089	156.533
	720	14.745	14.305	14.839	14.778	177.336
	1440	8.433	8.553	8.324	8.373	200.953

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5 Implementación del modelo.

3.1.5.1 Modelo de calibración.

Utilizando el modelo de calibración, que es aquel con punto de salida en la Bocatoma la Palma, se generó tres hidrogramas de crecida, uno para cada periodo de retorno (25, 50 y 100 años), los cuales están acordes a los valores de caudales máximos obtenidos mediante distribución de frecuencias empleada con los datos históricos registrados en la estación hidrométrica La Palma.

Las figuras 20 a 23 muestran el ajuste para los datos históricos de caudales máximos que se adjuntan en el anexo 1.



Figura 20: Distribución de frecuencias por el método Normal. Fuente: Elaboración propia.



Figura 21: Distribución de frecuencias por el método Gumbel. Fuente: Elaboración propia.



Figura 22: Distribución de frecuencias por el método SQRT. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23: Distribución de frecuencias por el método GEV con momento ponderado. Fuente: Elaboración propia.

El método con mejor ajuste para los datos históricos de entrada fue la distribución GEV con momento ponderado, por lo que los resultados obtenidos por dicho método fueron utilizados para la calibración del modelo. El caudal máximo calculado para diversos periodos de retorno, mediante la distribución GEV, se muestra en la tabla 10.

Periodo de Retorno	Caudal Máximo (m³/s)
2	176
5	363
10	542
25	858
50	1182
100	1605

Tabla 10: Caudales máximos por distribución de frecuencias.

Fuente: Elaboración propia.

Los hidrogramas de crecida generados para el modelo de calibración se muestran en las figuras 24, 25 y 26.

Los valores de caudal pico en la bocatoma La Palma para cada uno de los periodos de retorno se muestran en la tabla 11.

Caudal máximo de
crecida (m³/s)
1089
1265
1618

Tabla 11: Caudal máximo de crecida en bocatoma La Palma

Fuente: Elaboración propia.



Figura 24: Hidrograma de crecida del modelo de calibración para TR=25 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 25: Hidrograma de crecida del modelo de calibración para TR=50 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 26: Hidrograma de crecida del modelo de calibración para TR=100 años. Fuente: Elaboración propia.

El ajuste de los parámetros que intervienen en el modelo se realizó para la calibración de los valores de caudal para los periodos de retorno de 25 y 50 años, tomándose como valores de validación a los caudales correspondientes al TR de 100 años. Al comparar los valores obtenidos por probabilidades y aquellos obtenidos por el modelo HEC-HMS, se puede observar que el rango de variabilidad entre el valor probabilístico y el del modelo está en el orden de +27% para un TR de 25 años, +7% para un TR de 50 años y +1% para un TR de 100 años. Dado que los caudales obtenidos por el modelo son mayores a los generados por distribución de frecuencias, se puede aceptar dichos valores como válidos y al modelo como calibrado, ya que además brindan un margen de seguridad.

3.1.5.2 Modelo de cuenca Zarumilla.

Los hidrogramas de crecida registrados en el puente Bolsico, los cuales consideran el aporte de la totalidad de la cuenca, para cada periodo de retorno se encuentran en las figuras 27, 28, y 29. Los valores de caudal pico en el puente Bolsico para cada uno de los periodos de retorno se muestran en la tabla 12.

тр	Caudal máximo de
IR	crecida (m³/s)
25	1100
50	1290
100	1670

Tabla 12: Caudal máximo de crecida puente Bolsico.

Fuente: Elaboración propia.

El puente Bolsico se encuentra a aproximadamente 12300m aguas abajo de la bocatoma La Palma, y cuenta con un área de aporte mayor que la considerada para el cálculo de caudales en la bocatoma, por ello, los caudales máximos son mayores en este punto. Sin embargo, la variación en el caudal está en el orden del 3%.

El tiempo pico para los hidrogramas de máxima crecida en la bocatoma La Palma es 9.75 horas, mientras que el tiempo pico en el puente Bolsico es 10.5 horas. Esto se debe al tránsito de caudales que sucede entre los dos puntos antes mencionados, que por la distancia entre ellos, el tiempo pico se desfasa.



Figura 27: Hidrograma de crecida del modelo de cuenca Zarumilla TR=25 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 28: Hidrograma de crecida del modelo de cuenca Zarumilla TR=50 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 29: Hidrograma de crecida del modelo de cuenca Zarumilla TR=100 años. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Cambio de uso de suelo.

3.1.6 Escenario de cambio de uso de suelo para 2027.

El escenario de cambio de uso de suelo generado mediante el uso de cadenas de Markov para el 2027 como año horizonte, se muestra en la figura 30. El potencial de transición de uso de suelo en el área de estudio se muestra en la figura 31.

Como se evidencia en la figura 31, el área que con mayor potencial de cambio para el escenario del 2027 es el área de las subcuencas: Intercuenca 139343, 139345, 139347, 139349 y Palmales, mientras que las subcuencas Quebrada Seca, Hondonada y Lomillo no presentan un potencial de transición significativo al ser reservas ecológicas. El mapa generado se considera solamente un escenario de cambio de uso de suelo, cuyos resultados podrían validarse con la utilización de un mapa adicional a aquellos utilizados para la generación del escenario al año horizonte, de manera que se pueda generar un escenario al año del mapa adicional disponible (Cadavid & Rong, 2016).



Figura 30: Escenario de cambio en la cobertura en la cuenca Zarumilla. Fuente: Elaboración propia.



Figura 31: Potencial de transición de la cobertura en la cuenca Zarumilla. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que no existe una disponibilidad de mapas para la zona de estudio, se generó solamente el escenario a año de horizonte, sin llevar a cabo una validación, para cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo de fin de titulación.

3.1.7 Cambio de uso de suelo entre 2014 y 2017.

Con los mapas de suelo correspondientes a los años 2014 y 2017, se obtiene el mapa de cambio de uso de suelo entre ambos años. Como se aprecia en la figura 32, las tres transiciones más importantes tomando en cuenta el área de cambio son: Pasto a cultivo, bosque a cultivo y cultivo a pasto.

La ganancia y pérdida de superficie para cada tipo de cobertura de la cuenca en km² entre los años 2014 y 2017, se muestra en la figura 33.



Figura 32: Cambio de uso de suelo entre 2014 y 2017. Fuente: Elaboración propia.



Figura 33: Pérdidas y ganancias entre 2014 y 2017. Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse en la figura 33, el pasto posee una pérdida de superficie mayor a su expansión, mientras que los cultivos poseen una ganancia mayor a su pérdida de superficie, al igual que la vegetación arbustiva. Por otro lado el bosque posee una pérdida de superficie drástica, mucho mayor a su ganancia de área.

3.1.8 Cambio de uso de suelo entre 2014 y el escenario generado para 2027.

La figura 34 muestra el cambio de uso de suelo entre los años 2017 y el escenario de cobertura generado al año 2027:



Figura 34: Cambio de uso de suelo entre 2017 y 2027. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera que en la figura 32, la figura 34 indica que las tres transiciones más importantes tomando en cuenta el área de cambio para el 2027 son las mismas que para el 2017, es decir: Pasto a cultivo, bosque a cultivo y cultivo a pasto.

La ganancia y pérdida de superficie para cada tipo de cobertura de la cuenca en km² entre los años 2017 y 2027, se muestra en la figura 35:



Figura 35: Pérdidas y ganancias entre 2017 y 2027. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 35 se puede ver que la superficie de ganancia y pérdida de cobertura es mayor que entre el 2014 y el 2017, siguiendo una tendencia similar al cambio de uso de suelo entre dichos años. De la misma manera, el pasto posee una mayor pérdida de superficie que de ganancia, y los cultivos poseen una mayor expansión que pérdida. Se tiene además una reducción del área correspondiente al bosque, y un crecimiento del área de la vegetación arbustiva. Los cambios para las otras clasificaciones son mínimos.

El incremento de centro poblado debería ser mayor, sin embargo, las variables explicativas aplicadas en la generación del escenario no son suficientes para modelar satisfactoriamente el crecimiento de las ciudades (Narayan, Kumar, & Mohan, 2014). Se han obtenido mejores resultados de modelación de crecimiento urbano con la utilización de autómatas celulares, como en las experiencias de DongJie et al. (2011) y Verstegen et al. (2014). Como el área de poblados es mínima comparativamente con el área total de la cuenca, y el objetivo del presente trabajo no es modelar el crecimiento de los poblados, se puede despreciar las áreas urbanas.

En la tabla 13 se puede apreciar el cambio en las áreas de las diferentes coberturas de la cuenca:

Cobertura del Suelo	2014 (km²)	2017 (km²)	2027 (km²)
Bosque	360.2	320.6	286.5
Centro Poblado	13.1	16.6	16.7
Vegetación Arbustiva	8.1	25.2	50.0
Manglar	1.5	1.5	1.5
Cuerpo de agua	13.3	17.2	17.2
Cultivos	148.4	185.9	222.6
Pasto	329.3	306.4	278.9
Erial	1.1	1.2	1.2
Total	875	875	875

Tabla 13: Cambio en las áreas de las diferentes coberturas de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 13, la superficie del bosque disminuye progresivamente, al igual que el área del pasto, superficies que son reemplazadas por cultivos. Esto se debe a la expansión de actividades agrícolas en la cuenca. Pese a esto, también existe un crecimiento de vegetación arbustiva, y el reemplazo de cultivos por pasto. Este comportamiento puede deberse al abandono de tierras agrícolas y a la rotación de cultivos (SAGARPA, Rotación de Cultivos, 2012). Clasificaciones como el manglar, el erial y los cuerpos de agua no presentan un cambio significativo.

3.1.9 Caudales de máxima crecida correspondientes al escenario de cambio de uso de suelo al 2027.

Con la cobertura estimada mediante Terrset, se obtuvo nuevamente el número de la curva para cada subcuenca, los hidrogramas de crecida y los caudales máximos para la totalidad de la cuenca, los cuales se muestran en la tabla 14. Comparando los resultados del CN de la tabla 14 para el escenario de cobertura del 2027 y la cobertura actual (2017), las intercuencas 139341, 139343, 139345 y 139347 son las que presentan un cambio mayor en el número de la curva, disminuyendo hasta 7 unidades. Por otro lado, las subcuencas 139349, Hondonada, Lomillo, Quebrada Seca y Palmales no presentan un cambio significativo en el número de la curva, esto puede deberse al hecho que tres de las cinco cuencas mencionadas forman parte de la Reserva Nacional de Tumbes. La disminución del número de la curva en las cuencas antes mencionadas significa una mayor infiltración, y un menor caudal de crecida, como puede apreciarse en las
figuras 36, 37 y 38, que muestran los hidrogramas de máxima crecida para el escenario de cambio de uso de suelo del 2027.

Código HMS	Nombre Cuenca	CN
W500	Intercuenca Zarumilla 139341	65
W520	Intercuenca Zarumilla 139343	60
W540	Intercuenca Zarumilla 139345	60
W620	Intercuenca Zarumilla 139347	64
W740	Intercuenca Zarumilla 139349	77
W760	Hondonada	64
W950	Lomillo	57
W960	Quebrada Seca	61
W1130	Palmales	69

Tabla 14: Número de la curva para escenario de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 15 muestra los caudales máximos de crecida para el escenario de uso de suelo generado para el año de horizonte considerado.

cuenca zarunnila para el escenano de 2027.				
TD	Caudal máximo de			
IK	crecida (m³/s)			
25	1072			
50	1263			
100	1637			

Tabla 15: Caudales máximos de crecida en la	
cuenca Zarumilla para el escenario de 2027.	

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo pico de los hidrogramas de máxima crecida para el escenario de cambio de uso de suelo de 2027 tienen como tiempo pico 10.5hr, el mismo tiempo que aquellos determinados para el 2017, debido a que corresponden al mismo punto de salida en la cuenca. Como se mencionó anteriormente, los caudales de crecida son ligeramente menores que los calculados para el 2017, debido a su relación directa con el número de la curva.



Figura 36: Hidrograma de crecida del modelo de la cuenca Zarumilla para un TR=25 años, con el escenario de cobertura al 2027. Fuente: Elaboración propia.



Figura 37: Hidrograma de crecida del modelo de la cuenca Zarumilla para un TR=50 años, con el escenario de cobertura al 2027. Fuente: Elaboración propia.



Figura 38: Hidrograma de crecida del modelo de la cuenca Zarumilla para un TR=100 años, con el escenario de cobertura al 2027. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La modelización de la cuenca del Río Zarumilla se llevó a cabo satisfactoriamente, al igual que su calibración, que logró una correlación apropiada entre los valores de caudal máximo calculados por el modelo y los obtenidos probabilísticamente. Se puedo generar además el escenario de cambio de uso de suelo para el año 2027 y determinar su efecto en los caudales extremos de la zona de estudio.

El caudal de máxima crecida en la bocatoma La Palma, para un periodo de retorno de 25 años es de 1089m³/s. Para un TR de 50 años es 1265 m³/s y para una TR de 100 años es 1618m³/s.

El caudal de máxima crecida en el puente Bolsico, punto establecido como la salida de la cuenca Zarumilla, para un periodo de retorno de 25 años es de 1100m³/s. Para un TR de 50 años es 1290 m³/s y para una TR de 100 años es 1670m³/s.

Al comparar los caudales obtenidos por el modelo y aquellos calculados probabilísticamente por el ajuste de distribución GEV con la serie de máximos anuales registrados en la estación hidrométrica La Palma, no se observaron diferencias significativas. Por ello la calibración fue satisfactoria.

Debido a que alrededor de 280km² de los 874km² totales de la cuenca pertenecen a la Reserva Nacional de Tumbes, la cobertura de esta área no cambia en el escenario de uso de suelo generado. La zona que posee un mayor potencial de transición de uso de suelo son las cuencas: Intercuenca 139343, 139345, 139347, 139349 y Palmales.

Entre los años 2014, 2017 y el escenario con 2027 como año de horizonte, las transiciones con mayor área y por ende las más importantes son: pasto a cultivo, bosque a cultivo y cultivo a pasto. Existe una disminución de bosque y pasto y un aumento de cultivos y vegetación arbustiva. Las otras coberturas poseen mínimos cambios de área. La transición de bosque y pasto a cultivo se debe a la expansión de las actividades de agricultura en la zona de estudio. Por otro lado, el cambio de cultivo a pasto, puede deberse al abandono de las tierras por los agricultores o a la rotación de cultivos que estos llevan a cabo para mitigar el desgaste del suelo.

La cobertura de Centro Poblado no presenta un cambio de área significativo en el escenario generado, lo cual se debe a que la herramienta Land Change Modeler no es la más propicia para la modelización de este tipo de cambios, que necesitan más variables explicativas y otras alternativas de modelización como autómatas celulares. Al ser el área poblada bastante baja en la cuenca, no es una cobertura muy relevante.

El número de la curva calculado con el escenario de ocupación de uso de suelo al 2027 no cambia para las cuencas que comprenden la Reserva Nacional de Tumbes, mientras que para las intercuencas 139341, 139343, 139345 y 139347 existe una disminución de hasta 7 unidades, que implica una mayor infiltración y una menor escorrentía. Esto se debe a principalmente al cambio de cobertura de bosque y pasto a cultivo, ya que la mayor parte de los cultivos en la zona de estudio son de tipo frutal, lo que permite una retención mayor de agua en el suelo.

Los caudales calculados con la cobertura del escenario generado para el 2027 son menores a aquellos calculados para el 2017. Esto se debe a la expansión de los cultivos de tipo frutal que muestra el escenario. Sin embargo la variación de caudales no es muy significativa al tener caudales de 1072m3/s para un periodo de retorno de 25 años, 1263 m3/s para un TR de 50 años y 1637m3/s para una TR de 100 años.

RECOMENDACIONES

Para la generación de escenarios de cambio de uso de suelo, los mapas de cobertura históricos deben tener de preferencia la misma nomenclatura y deben estar en la misma escala.

Para validar el escenario generado debería disponerse de al menos un mapa adicional a aquellos utilizados para la generación de escenarios, de manera que se pueda generar un escenario al año del mapa adicional disponible y se pueda determinar el grado de exactitud que posee el procedimiento utilizado, para así asegurar que el escenario generado al año horizonte es cercano a la realidad.

En cuencas en donde el área poblada es la mayor superficie de cobertura, se debería utilizar otras variables explicativas de cambio de uso de suelo, además de un procedimiento con autómatas celulares y no con redes neuronales.

BIBLIOGRAFÍA.

- Adebayo, W., Olakunle, S., Adeoye, B., & Ayanniyi, M. (2017). *Runoff Hydrographs Using Snyder and* SCS Synthetic Unit Hydrograph Methods: A Case of Study Of Selected Rivers in South West Nigeria. Iloring: Journal of Ecologic Engineering.
- Aguilera, M. (2007). Estimación de funciones de distribución de probabilidad para caudales máximos en la región de Maule. . Talca: Universidad de Talca.
- Ahmad, M. (2009). Estimation of Clark's instantaneous unit hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph. *Journal of Water Resources Management*, 2417–2435.
- Ajmal, M., Moon, G., Ahn, J., & Kim, T. (2015). Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. *Journal of Hydro-environment Research*, 592–603.
- Al-anazi, K., & El-Sebaie, I. (2013). Development of intensity-duration-frequency relationships for Abha City in Saudi Arabia. *International journal of computational engineering research*, 58-65.
- Alcamo, J. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socioeconomic. *Hydrol Sci J J Des Sciences Hydrol*, 247–275.
- Allado, C., & Fuentes, L. (2009). Determinación de tormentas de diseño a partir de datos pluviográficos en zona media de la cuenca de Río Frío. Bucaramanga: Universidad de Santander.
- Allen, & Bateman. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada.* Cartagena: Grupo de Investigación y Transporte de Sedimentos.
- ANA. (2014). Actualización de Unidades Hidrográficas y Codificación Integral de Cursos de Agua Superficial en Ámbitos de Administraciones Locales de Agua. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego - Perú.
- Aparicio, F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México D.F: Limusa SA.
- Borreiros, Á. (2014). Evaluación de caudales de avenida mediante modelos hidrológicos distribuidos basados en ecuaciones de aguas someras 2D. Coruña: Universidad de Coruña.
- Cadavid, A., & Rong, Y. (2016). Land cover change during a period of extensive landscape restoration in Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Science of The Total Environment*, 669–679.
- Cando, L. (s.f.). Matapalo. Matapalo. Panoramio, Ecuador.
- CEDEX. (2013). Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Chavarri, E. (2008). *Métodos de análisis en recursos hídricos.* Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chira, J. (2009). Taller Regional sobre Metrología y Retos Tecnológicos de las Ciencias del Clima y Energía Renovable. Lima: SENHAMI.
- Chow, V. T. (1994). Hidrología Aplicada. Bogotá: McGraw-Hill.
- Clark, C. (1943). Storage and the unit hydrograph. ASCE Trans, 1419-1446.

- Crawford, N., & Maidment, D. (1966). *Digital Simulation in Hydrology: The Stanford Watershed Model IV Technical Report.* Palo Alto, CA: Stanford University.
- Croley, T., & Hartmann, C. (1985). Resolving Thiessen polygons. Journal of Hydrology, 363-379.
- DeFries, R. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Natural GeoScience*, 178-181.
- Deng, P., & Zhu, J. (2016). Analysis of effective Green-Ampt hydraulic parameters for vertically layered soils. *Journal of Hydrology*, 705-712.
- Diez, J. M. (2010). *Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS (Geo-HMS): pronóstico de crecidas .* Valladolid: Universidad de Valladolid .
- DongJie, G., & HaiFeng, L. (2011). Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 3761-3772.
- Eastman, J. (2016). *TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling System Manual.* Worcester: Clark Labs.
- EIA. (22 de Marzo de 2017). *Distribución de probabilidad en hidrología*. Obtenido de Escuela de Ingeniería de Antioquía: http://fluidos.eia.edu.co/hidrologiai/probabilidad/probabilidad.htm
- FAO. (2006). *Grupos Hidrológicos del Suelo.* Madrid: Organización para la Alimentación y la Agricultura.
- Fatorrelli, S., & Fernández, P. (2007). Diseño Hidrológico. Mendoza: Zeta Editores.
- Fernandez, J., & Caviedes, D. (2016). Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations: Sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 496–513.
- Ford, D., Pingel, N., & DeVries, J. J. (2008). *Hydrologic Modeling System: Applications Guide.* Washington D.C: US Army Corps of Engineers.
- Franchinia, M., Berninia, A., Barbettab, S., & Moramarcob, T. (2011). Forecasting discharges at the downstream end of a river reach through two simple Muskingum based procedures. *Journal of Hydrology*, 335–352.
- Green, W., & Ampt, G. (1911). Studies of soil physics: 1. The flow of air and water through soils. . Journal of Agricultural Science, 4,1-24.
- Gumindiga, W., Rwasoka, D., Nhapi, I., & Dube, T. (2016). Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Applications. *Physics and Chemistry of the Earth*, 51-63.
- Halwatura, D. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software*, 155-162.
- Horton, R. (1939). Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions of American Geophysical Union*, 693-711.
- Hsu, S., Huang, V., & Park, S. (2017). Water infiltration into prewetted porous media: Dynamic capillary pressure and Green-Ampt modeling. *Advances in Water Resources*, 43-59.
- INHAMI. (2005). Estudio Hidrológico de Caudales Máximos y Levantamiento de Información Ambiental en la Cuenca del Río Zarumilla. Quito: INHAMI.

- INAMHI. (2011). Implementación del Sistema de Alerta Temprana en la Cuenca del río Zarumilla. Quito: INAMHI.
- INHAMI. (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Laouacheria, F., & Mansouri, R. (2015). Comparison of WBNM and HEC-HMS for Runoff Hydrograph Prediction in a Small Urban Catchment. *Water Resour Manage*, 2485–2501.
- Leimer, S. (2011). Towards a new generation of high-resolution meteorological input data for small scale hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 317-332.
- MAGAP. (2017). Geovisualizador de mapas. Quito: Geoportal del agro ecuatoriano.
- MINAM. (22 de 02 de 2017). *Ministerio del Ambiente de Perú*. Obtenido de Mapa de cobertura vegetal: https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=7168e7e587c9436aaed3793b3 4363970
- Monsalve, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Muñoz, P. (2009). Redes Neuronales Multicapa. Málaga: Universidad de Málaga.
- Narayan, V., Kumar, P., & Mohan, K. (2014). Prediction of Land Use Changes Based on Land Change Modeler (LCM) Using Remote Sengsing: A Case Study of Muzaffarpur (Bihar), India. J. Geogr. Inst. Cvijic, 111-127.
- NASA, & USGS. (29 de 08 de 2016). Shuttle Radar Topography Mission. Obtenido de Earth Explorer: https://earthexplorer.usgs.gov/
- National Weather Service. (17 de 03 de 2017). *National Oceanic and Atmospheric Service*. Obtenido de National Weather Service: https://www.weather.gov/satellite
- Neppel, L., & Desbordes, M. (2001). Fréquence de l'épisode pluvieux à l'origine des inondations des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 267–273.
- Oleyiblo, J., & Li, Z.-J. (2010). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering*, 14-22.
- Oñate-Valdivieso, F., & Bosque-Sendra, J. (2010). Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 256–263.
- Overeem, A., A, B., & Holleman, I. (2008). *Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties.* 124-134: Journal of Hydrology.
- Ponce, V. (1989). Engineering Hydrology: Principles and Practices. New Jersey: Prentice Hall College.
- Ponce, V., Lohani, A., & Scheyhing, C. (1996). Analytical verification of Muskingum-Cunge routing. *Journal of Hydrology*, 235-241.
- Ramírez, M. (2003). Hidrología Aplicada. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Ruiz, E., & Martinez, M. (2015). *Hidrología Aplicada*. Bilbao: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao.

- SAGARPA. (2008). *Hidrología Aplicada a Pequeñas Obras Hidráulicas.* México D.F: Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural".
- SAGARPA. (2012). *Obras de excedencias.* Distrito Federal : Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación.
- SAGARPA. (2012). *Rotación de Cultivos.* Distrito Federal: Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Salas, R., & Fernández, Y. (2007). n-site regionalization to estimate an intensity-durationfrequency law: a solution to scarce spatial data in Spain. *Hydrologycal Processes*, 3507-3513.
- Sánchez, J. (2009). Hidrología e Hidrogeología. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Scharffenberg, W., & Ely, P. (2010). *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): Physically Based Simulation Components*. Las Vegas: 2nd Joint Federal Interagency Conference.
- SCS. (1972). National Engineering Book. Washington: Hydrology, Water Resources Publications.
- SCS. (1989). *Runoff Curve Number Calculation.* Washington: Soil Conservation Service US Department of Agriculture.
- Secretaría del Agua, & ANA. (2013). Plan Binacional de Desarrollo de la Región Fronteriza. Quito: Ministerio del Interior.
- Segerer, C. (2006). *Hidrología I.* Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Sghirla, S. (2010). diferencias entre taxonomia de suelos (Soil Survey Staff) y base referencia mundial de suelos (FAO). Santo Domingo: XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- Shadeed, S., & Almasri, M. (2010). Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. *Water Science and Engineering*, 1-13.
- Sivapalan, M. (2003). Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrol Sci J J Des Sciences Hydrol*, 857–880.
- Snyder, F. (1938). Synthetic unit hydrographs. Trans Am Geophysics, 447–54.
- Svensson, C., & Jones, D. (2010). Review of rainfall frequency estimation methods. *Centre for ecology and hydrology*, 33-45.
- Teixeira, J., & Carfan, A. (2014). Re-analysis of pluvial precipitation in southern Brazil. *Atmósfera*, 103-115.
- Thorndahl, S., & Rasmussen, M. (2012). Marine X-band weather radar data calibration. *Atmospheric Research*, 33-44.
- Turner, B., & Moss, H. (1993). *Relating land use and global land-cover change: A proposal for an IGBP-HDP core project.* Estocolmo: International Geosphere-Biosphere Programme .
- UBC. (2000). Manning's N value. Vancuver: University of British Columbia.
- UNNE. (2001). Hidrograma Unitario Sintético. Resistencia: Facultad de Ingeniería.
- USACE. (28 de 10 de 2016). *HEC-HMS Features*. Obtenido de Hec.usace.army.mil: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/features.aspx

USON. (2008). Hidrología. Hermosillo: Universidad de Sonora.

- Verstegen, J., & Karssenberg, D. (2014). Identifying a land use change cellular automaton by Bayesian data assimilation. *Environmental Modelling & Software*, 121-136.
- Viji, R., & Prasanna, R. (2015). Modified SCS-CN and Green-Ampt Methods in Surface Runoff Modelling for the Kundahpallam Watershed, Nilgiris, Western Ghats, India. *Aquatic Procedia*, 677-684.
- Vílchez, V. (2010). Estimación y clasificación de daños en materiales utilizando modelos AR y redes neuronales para la evaluaciónno destructiva con ultrasonidos. Granada: Universidad de Granada.
- Wilerson, J., & Merwade, V. (2010). Incorporating Surface Storage and Slope to Estimate Clark Unit Hydrographs for Ungauged Indiana Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 50-62.
- Wu, J. (2008). Land Use Changes: Economic, Social, and Environmental Impacts. *Agricultural & Applied Economic Association*, 6-10.
- Xiang, L., & Ling, W. (2016). Self-adaptive Green-Ampt infiltration parameters obtained from measured moisture processes . *Water Science and Engineering*, 256–264.
- Yannopoulos, S., Katsi, A., & Papamichail, D. (2010). *Comparative Analyisi of Synthetic Unit Hydrograph Methids Using WMS Rainfall- Runoff Process Simulation.* Thessaloniki: SRCosmos.
- Ye, B. (2003). Changes in Lena river streamflow hydrology: human impacts versus natural variations. *Water Resources Research*, 120.
- Zapata, A. (2002). Guía Didáctica de Hidrología. Almería: Universidad de Almería.

ANEXOS

Anexo 1: Datos históricos de caudales máximos en la estación La Palma.

AÑO	Q (m³/s)	AÑO	Q (m³/s)
1964	85	1982	No Data
1965	858	1983	No Data
1966	94	1984	No Data
1967	140	1985	No Data
1968	No Data	1986	No Data
1969	166	1987	No Data
1970	No Data	1988	No Data
1971	80	1989	No Data
1972	102	1990	No Data
1973	790	1991	No Data
1974	No Data	1992	No Data
1975	309	1993	127
1976	233	1994	No Data
1977	244	1995	62
1978	No Data	1996	No Data
1979	192	1997	No Data
1980	No Data	1998	750
1981	No Data	1999	50

Fuente: INHAMI, 2005. Elaboración: INHAMI, 2005.